



# Variabilité climatique spatiale et temporelle de trois massifs des Alpes françaises : les Écrins, la Vanoise et le Vercors. Quelles caractéristiques à l'échelle des Alpagnes Sentinelles ?

Amélie Arnould

## ► To cite this version:

Amélie Arnould. Variabilité climatique spatiale et temporelle de trois massifs des Alpes françaises : les Écrins, la Vanoise et le Vercors. Quelles caractéristiques à l'échelle des Alpagnes Sentinelles ?. Climatologie. 2014. dumas-01110483

**HAL Id: dumas-01110483**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01110483>**

Submitted on 28 Jan 2015

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Master 2 « Sciences du territoire »  
Mention « Systèmes territoriaux, Aide à la Décision,  
Environnement » (STADE)

## Mémoire M2 Recherche

# Variabilité climatique spatiale et temporelle de trois massifs des Alpes françaises : les Ecrins, la Vanoise et le Vercors.

Quelles caractéristiques à l'échelle des Alpes  
Sentinelles ?

Mémoire soutenu le **11/06/2014**

Par **Amélie ARNOULD**

### Devant un jury constitué de :

- *Madame Sandra ROME - Maître de conférences, LTHE, Grenoble*
- *Monsieur Sylvain BIGOT - Professeur, LTHE, Grenoble, Maître de stage*
- *Monsieur Baptiste NETTIER- Agronome, IRSTEA, Grenoble, Co-encadrant de stage*

## RESUME

L'étude cherche à appliquer une méthode servant à caractériser la variabilité climatique d'un échantillon d'alpages suivis participant au dispositif Alpes Sentinelles. La méthode consiste à caractériser les spécificités climatiques locales, en intégrant notamment la variabilité interannuelle comme caractéristique discriminante. Les analyses s'effectuent sur la base de séries climatiques sur la période 1993-2013 issues de stations du réseau Météo France, mais aussi d'autres données sur l'observation issues de réseaux spécifiques (Observatoire éco-climatique des Hauts Plateaux du Vercors et données HISTALP). Les objectifs sont multiples : analyser les paramètres clés en lien avec les activités pastorales, caractériser et comparer la variabilité climatique à l'échelle des trois massifs alpins : les Ecrins, la Vanoise et le Vercors en proposant une typologie des différents climats locaux attenants à ces massifs. Cette typologie aboutie notamment à des indicateurs concernant la réponse climatique locale à des événements de type extrêmes.

**Mots clés : climat, Alpes Sentinelles, écosystèmes, Alpes françaises, analyses de données multivariées.**

## ABSTRACT

This study seeks to apply a method in order to characterize the climate variability of a sample of (mountain/alpine) pastures participating in the Alpes Sentinelles plan. The method involves characterizing the local climate characteristics, by incorporating the inter-annual variability as a discriminant feature. The analysis is done on the basis of climate series for the period 1993-2003 of the Météo France network. Other observations data from specific networks will also be used (Observatoire éco-climatique des Hauts Plateaux du Vercors and HISTALP data).

There are two main objectives: to analyze the key parameters related to pastoral activities, and to characterize and compare climate variability across three alpine massifs: Ecrins, Vanoise and Vercors, by proposing a typology of local climates attached to these massifs. This typology leads to indicators related to the climate response to such extreme events.

**Key words : climate, Alpes Sentinelles, ecosystem, French Alps, multivariates analysis data.**

## REMERCIEMENTS

De sincères remerciements à tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de cette recherche.

En particulier, je tiens à remercier Monsieur Sylvain Bigot (LTHE), mon maître de stage, qui a su me guider dans mon travail et m'a aidé à trouver des solutions pour avancer. Sa disponibilité m'a été d'un grand secours. Je remercie pour les mêmes raisons Monsieur Baptiste Nettier (IRSTEA), co-encadrant de stage.

Merci aux membres du comité de pilotage : Clotilde Sagot (PNE), Vincent Augé (PNV), Pierre-Eymard Biron (PNRV), Simon Vieux (CERPAM) d'avoir fait ces déplacements dans le but d'avancer ensemble autour de cette problématique.

Merci à Christophe Chaix, de l'Observatoire savoyard du Changement Climatique, d'avoir suivi avec intérêt cette recherche. Merci aussi pour ses conseils.

Merci Clément, pour ton rôle de conseiller et technicien informatique.

Merci Thibault, pour ta relecture et tes critiques.

Enfin, mes chers parents, merci à vous. Merci de m'avoir soutenu moralement et financièrement pendant toutes ces années. C'est en grande partie grâce à vous que je peux présenter ce mémoire de recherche aujourd'hui.

## SOMMAIRE

Résumé .....	2
Abstract .....	2
Remerciements .....	3
Liste des acronymes.....	5
Introduction.....	6
1. Contexte général de l'étude.....	12
2. Methodologie .....	16
3. Résultats.....	21
Conclusion .....	38
Perspectives.....	40
Références .....	41
Table des illustrations.....	45
Tables des matières.....	48
Annexes .....	49

## **LISTE DES ACRONYMES**

CERPAM : Centre d'Etudes et de Réalisations Pastorales Alpes Méditerranée

CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique

EDYTEM: Environnements, DYnamiques et TErritoires de la Montagne

HISTALP : Historical instrumental climatological surface time series of the greater ALPine region

IPCC : Intergovernmental Panel On Climate Change

LECA: Laboratoire d'ECologie Alpine

LTHE : Laboratoire d'Etude des Transferts en Hydrologie et Environnement

MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

OMM : Organisation Météorologique Mondiale

ONERC : Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique

PNE : Parc National des Ecrins

PNRV : Parc Naturel Régional du Vercors

PNV : Parc National de la Vanoise

SPOT: Satellite Pour l'Observation de la Terre

ZAA: Zone Atelier Alpes

## INTRODUCTION

Avec une augmentation des températures moyennes annuelles de 0,9°C (ONERC, 2006) contre 0,6 +/- 0,2°C pour la moyenne mondiale (IPCC, 2007), les Alpes figurent parmi les territoires les plus touchés par le réchauffement climatique. Les fluctuations climatiques récentes à l'échelle planétaire ainsi que leurs traductions locales soulèvent de nombreuses questions en terme d'adaptation des espèces (Menzel *et al.*, 2006 ; Morisette *et al.*, 2009). Ainsi, dans son rapport de 2007, le GIEC a mis en évidence la vulnérabilité des écosystèmes montagnards face au changement climatique annoncé. D'importants changements de la couverture nivale en montagne sont attendus, et certains ont déjà été détectés (Marty, 2008). Couplées à l'augmentation des extrêmes climatiques (sécheresses, vagues de chaleur accrue, etc.), ces variations climatiques posent de réelles difficultés aux éleveurs et aux bergers en ce qui concerne la gestion actuelle et future des alpages. Les contraintes imposées par ces changements à moyen et à long terme sont d'ordres environnementaux, sociaux et économiques. De ce fait, l'évolution des alpages soulève un certain nombre de questions : d'une part concernant la gestion des incertitudes à court terme (notamment sur la composante liée à l'aléa météorologique), et d'autre part sur l'adaptation et les conséquences de changements climatiques à long terme (Nettier *et al.*, 2013). L'étude des impacts du changement climatique, et plus particulièrement des modes d'adaptation, nécessite une étude pluridisciplinaire sur le long terme puisque les processus en jeu s'articulent non seulement autour du climat, mais aussi autour des milieux, des pratiques agropastorales et des systèmes d'élevage.

## LES ALPAGES, ESPACES A FORTS ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX, SOCIAUX ET ECONOMIQUES

Les alpages remplissent des fonctions à la fois écologiques, sociales et économiques. D'un point de vue écosystémique, la montagne se caractérise par une diversité floristique et faunistique souvent bien supérieure à celle que l'on trouve généralement en plaine. Cette différence est le résultat d'une combinaison de facteurs liés à la grande variété des milieux de montagne, en particulier, des niches et habitats plus nombreux, des bilans radiatifs spécifiques, des conditions géologiques favorables à la spéciation et l'apparition d'espèces, etc. (Dobromez, 2001).

Aujourd'hui, les zones pastorales sont reconnues comme « *espaces naturels à protéger (...) du fait de la présence d'espèces rares, de leur originalité floristique ou de leur place dans l'organisation du paysage* » (Fleury *et al.*, 2003). Partie intégrante de nombreux systèmes d'élevages, leurs rôles sont multiples : ils fournissent les ressources fourragères nécessaires aux cheptels durant la saison estivale et permettent de décharger les exploitations du poids que représente la gestion quotidienne des animaux (Nettier, 2014). De ce fait entretenues, les prairies permettent le maintien de

l'agriculture d'élevage durable et de qualité (produits AOC), ainsi que le maintien d'actifs agricoles (Sérés, 2010). Il en résulte un entretien des paysages ainsi qu'une valorisation du terroir. L'alpage se démarque alors par son patrimoine culturel et naturel dont sa biodiversité.

Les particularités de ces milieux complexifient leurs études, du fait notamment de la multiplicité des enjeux, des acteurs et des processus susceptibles de les impacter. Dans les circonstances actuelles de réchauffement climatique, ces systèmes sont plus ou moins résilients. Ils se comportent d'une manière non-linéaire, avec des seuils rythmant leurs dynamiques dans le cadre d'intégrations très étroites (Folke *et al.*, 2002). La compréhension des phénomènes qui les régissent est essentielle à la mise en place d'une gestion durable de ces territoires. C'est notamment pour ces raisons que certains concepts, développés par les courants de recherche, comme la flexibilité et la résilience des systèmes sociaux et écologiques (Walker *et al.*, 2004), servent de base à l'analyse du fonctionnement des alpages et à leur capacité d'adaptation.

## **LES ALPAGES SENTINELLES, INDICATEURS DES CRISES CLIMATIQUES AUJOURD'HUI...**

Lors des épisodes de sécheresse de 2003 et 2005 dans les Alpes du Sud, des changements dans les pratiques pastorales ont été signalés. Associés aux observations révélant des zones de surpâturage et aux craintes concernant la dégradation d'espèces d'altitude, ces constats ont inquiété les agents des parcs (Nettier *et al.*, 2010). La Commission Agriculture qui s'est réunie en novembre 2005 a défini, entre autres, les alpages comme espaces à enjeux partagés face au changement climatique et comme aires d'observation, qui sont à la base du dispositif Alpagnes Sentinelles lancé officiellement en 2008/2009. Ce dispositif cherche à anticiper les impacts des aléas climatiques en mettant en place une nouvelle forme de gouvernance partagée. Il réunit à la fois éleveurs, gestionnaires et chercheurs autour d'un objectif de gestion durable des alpages.

Les prairies alpines, entre autres, sont façonnées par les conditions climatiques quelle que soit la saison. De façon générale, des études ont montré que les espèces de montagne, et en particulier celles présentant un cycle de croissance rapide comme les herbes et fougères, sont celles qui se sont le plus déplacées (Lenoir *et al.*, 2008). Plusieurs déclinaisons liées aux perturbations climatiques affectent les écosystèmes d'altitude : modification du rythme phénologique, de la production, lutte contre les maladies, changement de la composition floristique, etc. (Seguin et Soussana, 2006). Dans certains cas, les dégradations subies par les espèces sont irréversibles. Du fait du manque de ressources disponibles lors des épisodes de sécheresse, les alpages, soit une grande partie des systèmes herbagers, deviennent très vulnérables (Lemaire et Pflimlin, 2007). De plus les conditions difficiles dans lesquels évoluent ces systèmes ne facilitent



pas la mise en place de solutions d'adaptations pérennes et durables (recours à l'irrigation...).

En hiver, l'étude des séries disponibles relatives à l'enneigement sur la période 1959-2005 met en évidence une baisse de l'épaisseur du manteau neigeux (Durand *et al.*, 2009b). Le nombre de jours avec le sol enneigé a lui diminué à basse et moyenne altitude (Ancey, 2005). Cette diminution affecte, tout comme l'augmentation des températures, la phénologie et la croissance herbacée (Ramming *et al.*, 2010). Elle s'explique par l'augmentation notable des températures à moyenne altitude, lesquelles conduisent à une augmentation des précipitations sous forme liquide au détriment des précipitations sous forme solide (Bavay *et al.*, 2009). Aussi, depuis 1950, la limite des précipitations neigeuses est remontée de plus de 100 mètres dans les Alpes (Seiler, 2006). Les effets liés à la surproduction de biomasse sur une saison vont modifier de ce fait la dynamique des écosystèmes (Ramming *et al.*, 2010).

Dans un contexte où les aléas climatiques deviennent de plus en plus fréquents, le système d'alpage devient un lieu d'observation privilégié pour évaluer les capacités d'adaptation des prairies de montagne. D'autant qu'il s'agit à la fois de la biodiversité mais également du caractère « productif » de ces pâturages qui sont menacés.

### **...POUR LIMITER LES IMPACTS DEMAIN.**

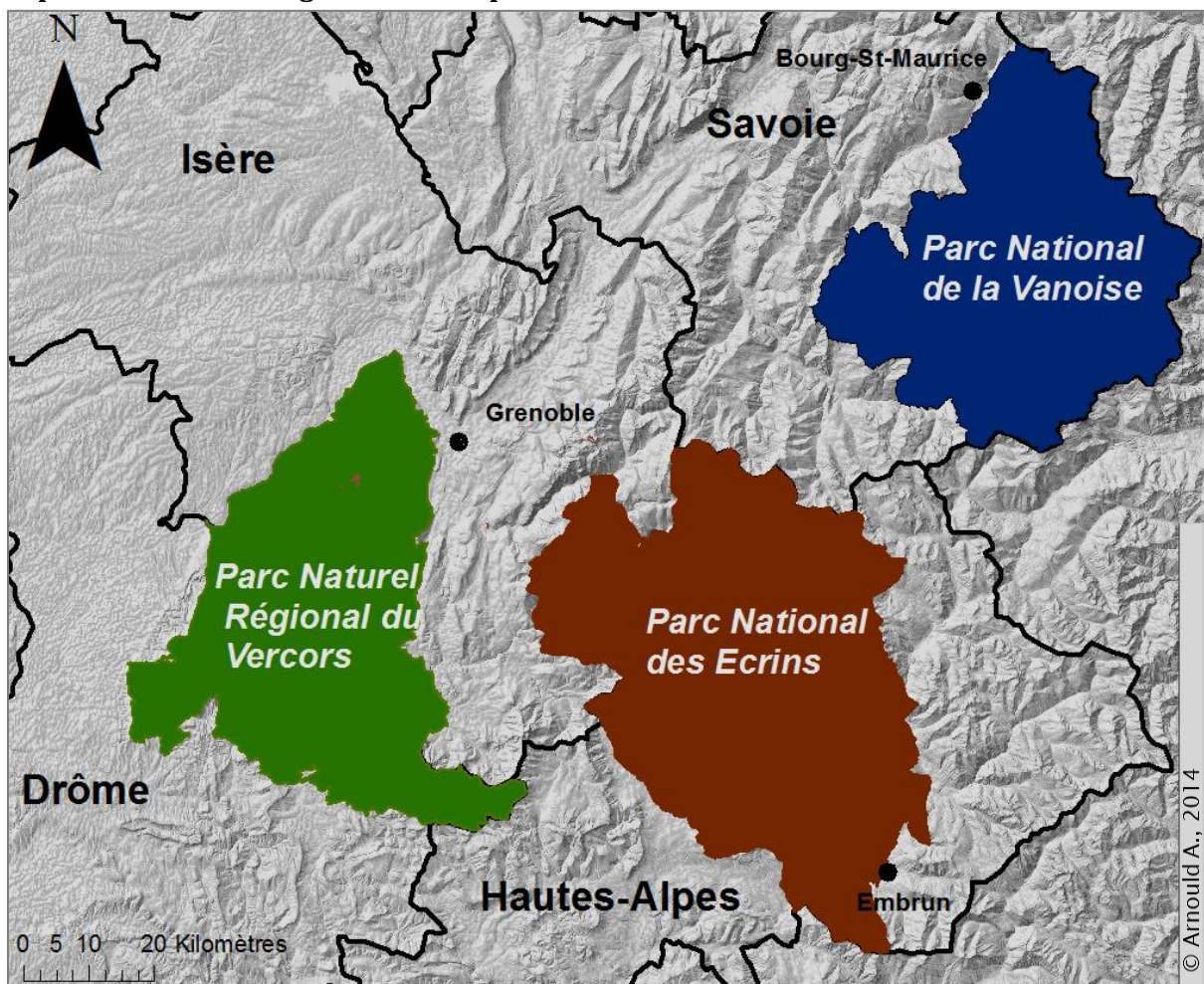
Par ailleurs, si la recrudescence de la fréquence et l'intensité des épisodes de sécheresses dans les Alpes est un signe évident des perturbations du système climatique (Calanca, 2007). Beniston (2004) envisage que les impacts les plus notables sont susceptibles de se produire lors de ces événements climatiques.

Définies par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), les sécheresses sont les conséquences d'un déficit hydrique lié à un manque de précipitations sur une période prolongée. Si aucun changement notable n'est attendu d'ici aux années 2020 quant à l'évolution probable de ces sécheresses, une évolution très significative touchant les sécheresses agricoles vers le milieu du XXI<sup>ème</sup> siècle est probable. Alors qu'à la fin du siècle, ce sont les sécheresses météorologiques qui risquent d'apparaître. Ces changements impacteront aussi leur saisonnalité à long terme (Soubeyroux *et al.*, 2011). Gobiet (2013) complète cela en démontrant que les conditions ayant occasionné la vague de chaleur de 2003 pourraient se reproduire tous les deux ans d'ici à la fin du siècle. Au vu des constats et des prédictions réalisés à ce jour, la nécessité d'un dispositif de suivi Sentinelles pour une gestion durable des territoires prend alors tout son sens.

L'objectif de cette recherche, réalisée dans le cadre d'un stage de master au Laboratoire d'Etude des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE) de Grenoble, et en collaboration avec l'Institut de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (IRSTEA), et financé par les Parc Nationaux des

Ecrins (PNE) et de la Vanoise (PNV), ainsi que le Parc Naturel Régional du Vercors (PNRV) (Figure 1), cherche à caractériser la variabilité climatique à l'échelle d'alpages participant au dispositif Alpes Sentinelles. Ce premier diagnostic climatique doit servir d'outil d'aide à la décision afin de comprendre les impacts causés par le réchauffement climatique. Il s'insère dans les recherches visant à préserver l'avenir de l'alpage par des pratiques pastorales adaptées, et participe aux recherches menées depuis 2008 dans le cadre de la Zone Atelier Alpes (ZAA) du CNRS. Compte tenu des incertitudes relatives au fonctionnement futur des systèmes pastoraux, il convient de bien évaluer les spécificités climatiques locales ainsi que les paramètres influençant la croissance et la phénologie herbacée dans le but d'établir un diagnostic climatique à une échelle la plus fine possible. La prise en compte de ces caractéristiques locales, couplée à l'étude de la variabilité climatique récente, va permettre de chercher à **établir un diagnostic climatique adapté à l'échelle d'alpages dans le but de fournir un outil d'aide à la gestion pour le suivi et la comparaison des systèmes agropastoraux localisés dans les Ecrins, la Vanoise et le Vercors.**

FIGURE 1: Répartition des parcs naturels (Ecrins, Vanoise, Vercors) au sein de différents départements de la région Rhône-Alpes.



## UNE APPROCHE REGIONALE POUR DES REPONSES LOCALES

« *La question de l'adaptation au changement climatique est complexe ; d'une part sur l'incertitude dont elle fait l'objet et d'autre part sur la manière de l'aborder* » (Sérés, 2010). Les modèles utilisés aujourd'hui dans la recherche des impacts des changements climatiques, notamment sur les écosystèmes alpins, ont permis de mettre en évidence et d'identifier les paramètres climatiques qui les contrôlent : températures estivales et hivernales, mais aussi évapotranspiration (Yoccoz *et al.*, 2010). Les premiers seront entre autres utilisés dans cette étude afin de mieux cibler les spécificités climatiques susceptibles de perturber l'état des écosystèmes pastoraux.

La mise en place d'un diagnostic climatique tel qu'il est nécessaire ici doit être effectuée selon des échelles spatiales et temporelles différentes. Dans le cadre d'un climat local représentatif des alpages, nous avons besoin d'être très précis (Moisselin *et al.*, 2002). Si les impacts causés aux activités pastorales sont le fruit d'une succession de situations météorologiques (court terme) particulières, l'étude doit prendre en compte la variabilité interannuelle du climat (long terme). Autrement dit, il faut s'intéresser aux moyennes, aux écarts à cette moyenne, aux événements extrêmes ainsi qu'à leur récurrence afin de déceler et mettre en évidence les caractéristiques climatiques des différentes zones étudiées. Enfin, bien qu'un climat régional homogène puisse être caractérisé par la juxtaposition des climats locaux (Douguédroit et Saintignon, 1974), ces derniers sont étroitement liés à la topographie du terrain. Notamment, l'adret, l'ubac et les fonds de vallées constituent des facteurs explicatifs des types de temps locaux (Douguédroit et Saintignon, 1984). Ces facteurs seront également indispensables à la mise en évidence des phénomènes locaux. Les climats locaux se spécifient donc en fonction des variables qui les constituent (températures, précipitations, vent, humidité, etc.), lesquelles sont assujetties aux conditions géographiques locales (exposition, altitude, etc.). D'où la difficulté d'évaluer le changement climatique dans les régions de montagne du fait de la complexité des facteurs corrélés (Beniston, 2005).

La réponse à notre problématique passe donc par la validation de nombreuses hypothèses :

- La première hypothèse cherche à démontrer que la variabilité spatiale des paramètres climatiques (températures et précipitations) est sous l'influence de l'altitude et de l'exposition ;
- La deuxième cherche à démontrer que l'évolution climatique au cours des dernières décennies répond aux tendances observées aux échelles supérieures dans les Alpes ;
- La dernière cherche à démontrer que les caractéristiques géographiques locales conduisent à une différenciation des climats de fine échelle.

En fonction des séries météorologiques Météo France disponibles, il s'agit à la fois de caractériser le climat régional et les climats locaux les plus représentatifs des alpages. Tout d'abord, un travail d'analyse des gradients thermiques et pluviométriques est

effectué afin d'évaluer et de mettre en évidence les paramètres influençant les effets locaux (topographie, etc.). Les stations sélectionnées comme étant les plus représentatives du climat tel qu'attendu théoriquement selon les modèles de régression avec l'altitude sont comparées entre elles. Puis une analyse comparative sera effectuée par rapport au climat moyen défini par des bases de données validées (type HISTALP : séries longues de variables climatiques homogénéisées) sur la période 1993-2013, ainsi que par rapport aux séries (certes courtes : 2005-2013) d'une station installée sur un alpage du Vercors (Darbounouse). Cet alpage est le seul à disposer pour l'instant d'un parc instrumentalisé permettant un suivi climatique complet, précis et actualisé (bilan thermique, pluviométrique et radiatif). Cette analyse va permettre d'analyser les tendances entre échelle locale et régionale.

Sur la base d'indicateurs thermiques et pluviométriques utilisés pour une différenciation des types de climat en France (Joly *et al.*, 2010) – et adaptés ici selon les spécificités climatiques de la région alpine et selon les facteurs influençant l'état des écosystèmes pastoraux – une identification de zones climatiques est effectuée. Ces 14 indicateurs sont qualifiés d'indices bioclimatiques. La typologie est établie suite à deux analyses statistiques multivariées : une Analyse en Composantes Principales (ACP) et une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH). La mise en relation des interprétations résultant de ces analyses permet de répondre à la problématique et de mettre en évidence des zones climatiques cohérentes sur le plan de la variabilité spatio-temporelle. Il est possible ensuite d'étudier plus précisément ces espaces en termes de changement climatique en fonction d'années extrêmes identifiées.

À la période où ce mémoire est bouclé, la suite de l'étude et du stage (dont les résultats finaux sont attendus d'ici mi-juillet) se poursuit. Elle va consister en un travail d'étude de cas précis (année caractéristique, station caractéristique) et la disponibilité de données issues de l'imagerie SPOT et Landsat va également permettre une étude plus précise des conditions d'enneigement en 2013 sur les différents Alpages Sentinelles.

Ce mémoire s'articule en 3 points, avec en premier la présentation de l'espace d'étude ainsi que le choix et la collecte des données. Les deux autres parties concernent la méthodologie employée ainsi que la présentation des premiers résultats et des perspectives attendues.



# 1. CONTEXTE GENERAL DE L'ETUDE

## 1.1. LE PROGRAMME ALPAGES SENTINELLES

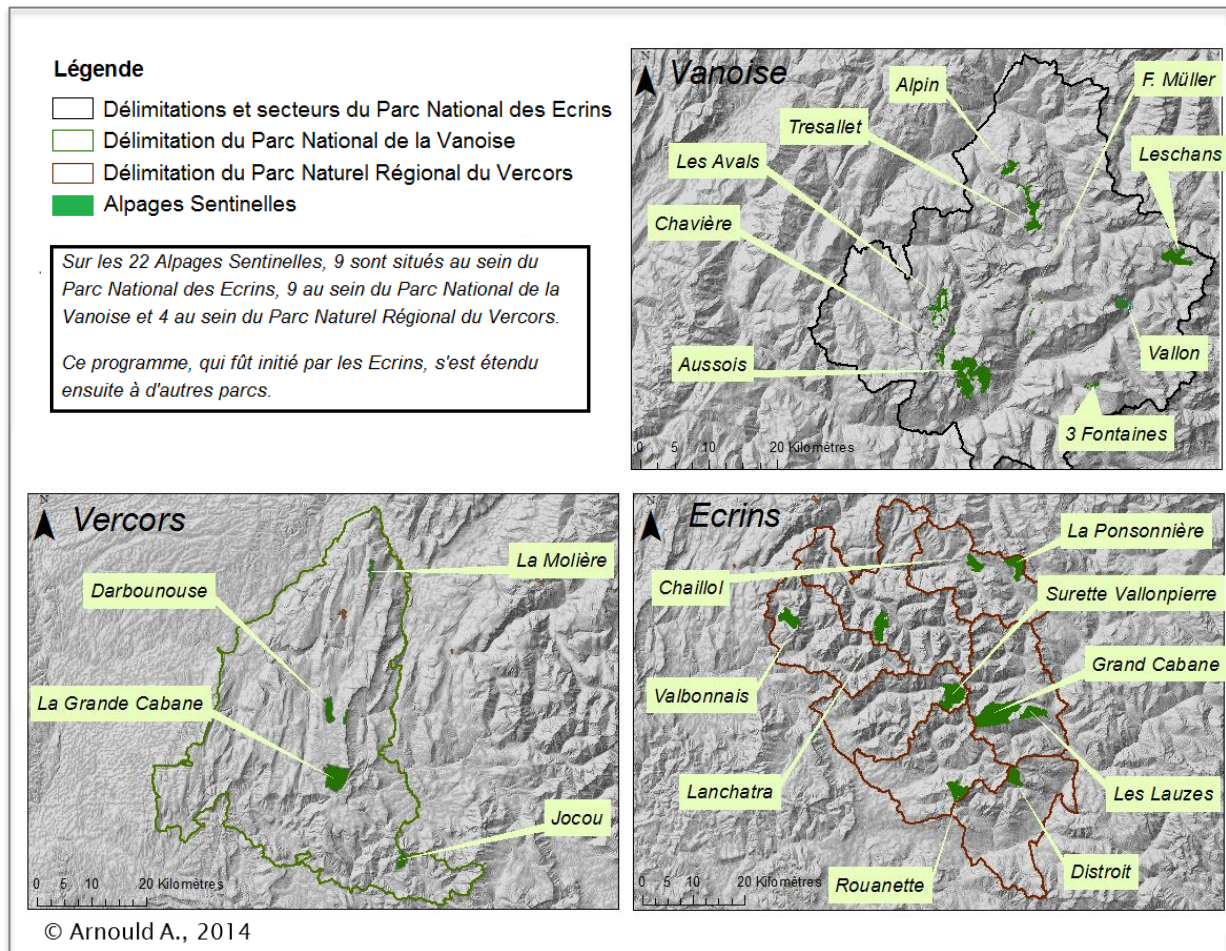
Le programme Alpes Sentinelles est un dispositif d'observation mis en place à la suite des épisodes de sécheresses survenues dans les Alpes en 2003 et 2005. Il est reconnu en tant que système d'observation par la Zone Atelier Alpes (<http://www.za-alpes.org/>). Intégrée au Réseau des Zones Ateliers de l'INEE (Institut Ecologie et Environnement), la ZAA fait partie des 10 Zones Ateliers de la France métropolitaine ; lesquelles constituent un réseau de recherches interdisciplinaires sur l'environnement et les anthroposystèmes en relation avec les enjeux sociétaux. La ZAA concentre ses recherches sur la diversité, le fonctionnement et les services des systèmes alpins, dans un contexte de changement climatique et de mutations des territoires de montagne. Les écosystèmes montagnards sont au cœur des recherches qui réunissent autour d'une même plateforme des chercheurs et acteurs concernés par la gestion des territoires (gestionnaires d'espaces protégés, collectivités territoriales, etc.).

Le dispositif est avant tout un espace de dialogue pour anticiper l'impact des aléas climatiques sur la ressource fourragère et la biodiversité, en lien avec les pratiques des alpages. Il s'articule autour de plusieurs thématiques : la caractérisation du climat local, l'évaluation et le suivi de la ressource en herbe de l'alpage, le suivi de l'évolution de la diversité végétale, le suivi des pratiques et leurs évolutions en alpages, et enfin l'analyse du fonctionnement des exploitations et de leurs adaptations face aux épisodes de sécheresse. Les partenaires sont nombreux : CERPAM (Centre d'Etudes et de Réalisations Pastorales Alpes-Méditerranée), Chambre d'Agriculture de Rhône-Alpes, Fédération des Alpes de l'Isère, EDYTEM (Environnements, DYnamiques et TErritoires de la Montagne, Chambéry), IRSTEA, LECA (Laboratoire d'Ecologie Alpine, Grenoble), LTHE, laboratoire PACTE (Politiques publiques, ACTION politique, Territoires), Suaci (pôle de compétence au service du monde agricole et des territoires alpins), etc. Au total, 22 alpages (Figure 2) ainsi que 29 exploitations sont suivis par les protocoles dans le PNE, PNV et PNRV.

Des protocoles adaptés aux spécificités du dispositif ont été mis en place. Ils sont regroupés selon 3 axes de recherches concernant 1) le climat, 2) les pratiques agropastorales et 3) l'évolution des milieux. Pour le premier, certaines cabanes d'alpages ont été équipées ces dernières années de pluviomètres, lesquels sont relevés manuellement par les bergers durant la saison d'estive. Certains alpages sont également équipés de postes de mesures permettant l'acquisition des données thermiques et pluviométriques (dont certaines mises en place pour la recherche en écologie alpine). Par ailleurs, la mise en place d'un protocole semi-automatisé d'analyse de données MODIS permet d'étudier la dynamique de déneigement annuelle des alpages (Bigot *et al.*, 2010). Cependant, la mise en fonctionnement récente, la discontinuité temporelle ainsi que l'incertitude

quant aux différentes manières d'estimer les relevés mesurés par les pluviomètres ne permettent pas l'utilisation des données pour la caractérisation de la variabilité climatique, ou du moins pas pour le moment.

**FIGURE 2: Répartition des Alpes Sentinelles au sein des parcs naturels alpins : le Parc National des Ecrins, le parc National de la Vanoise, le Parc Naturel Régional du Vercors.**



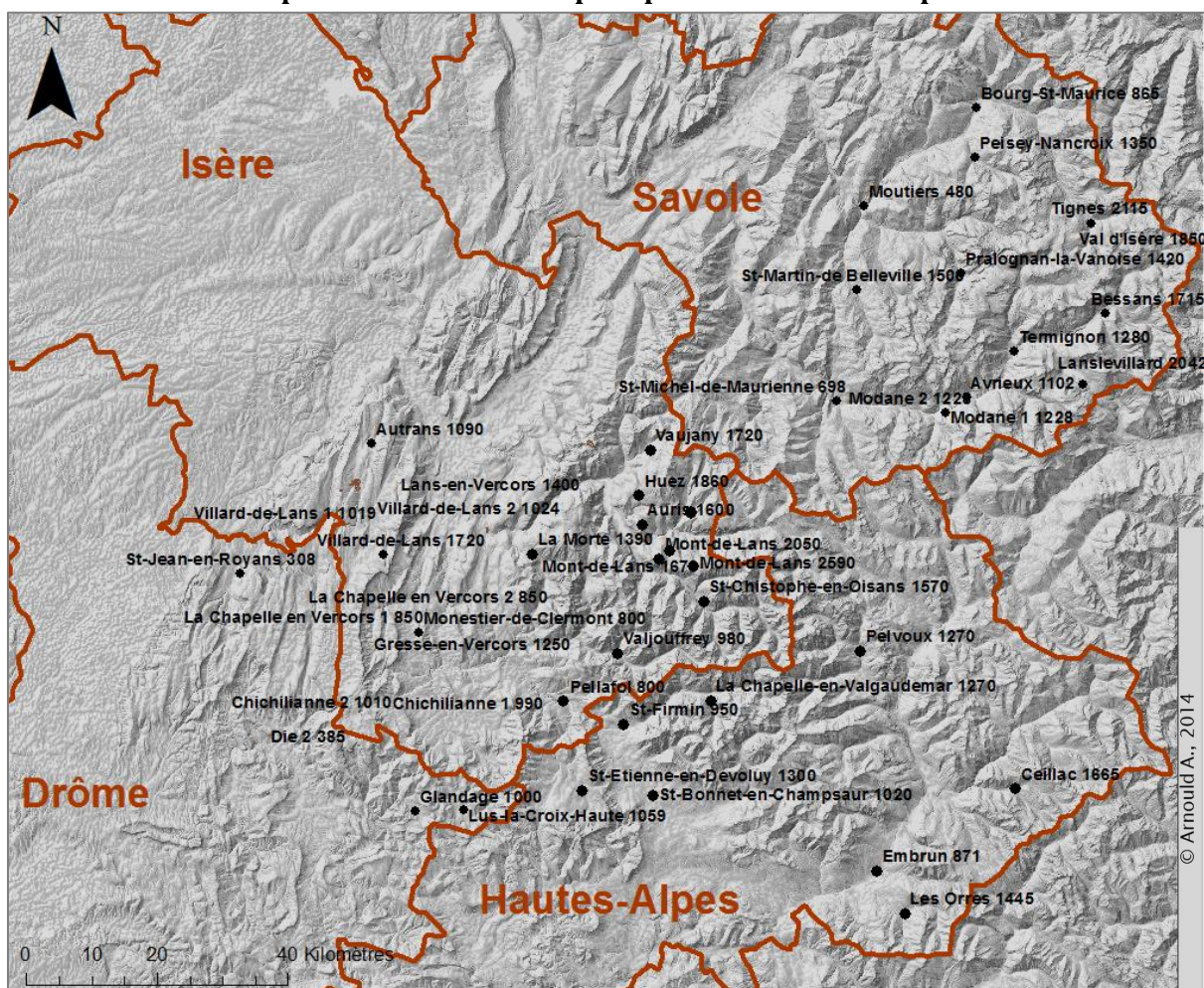
## 1.2. LES SERIES CLIMATIQUES ISSUES DU RESEAU METEO FRANCE

Bien qu'elles soient en constante augmentation aujourd'hui du fait des nombreux réseaux météorologiques (privés ou publics) récemment mis en place, notamment dans le contexte de la volonté de suivi du réchauffement climatique, la recherche de stations météorologiques a conduit à la sélection de stations issues du réseau Météo France exclusivement. Ce dernier est considéré comme le plus ancien et fournissant les données de meilleure qualité. Néanmoins, dans des régions montagneuses comme les Alpes, les conditions géographiques ont fortement restreint l'homogénéisation spatiale de ces stations. La plupart sont localisées à proximité des vallées, à des altitudes souvent bien moindres que celles des systèmes éco-climatiques et pastoraux que l'on cherche à étudier. Aussi, les ruptures dans les séries climatiques liées au(x) changement(s) de capteurs, les modifications de l'environnement du poste et tout simplement les interruptions de mesures de certains postes sont autant de critères réduisant le nombre



de stations utilisables pour l'étude. Il a fallu faire un choix entre le nombre d'années concernées par l'étude compte tenu du nombre de stations disponibles par rapport à ces années. En effet, le nombre de stations peut varier du simple au double selon la longueur des séries enregistrées souhaitées. Le meilleur compromis trouvé est la période 1993-2013. Une période plus longue de 10 années aurait fortement restreint l'échantillon, ainsi que sa répartition spatiale sur les différents massifs. Sur les 51 stations présélectionnées pour l'étude, seulement 32 d'entre elles (Figure 3) vont être analysées dans un premier temps à partir des données mensuelles. La suite de l'analyse, qui requiert des données quotidiennes, restreint une nouvelle fois le réseau exploitable et conduit l'effectif à seulement 22 stations (Annexe 1).

**FIGURE 3 : Localisation des 32 stations Météo France disposant de données mensuelles relatives aux températures et aux précipitations sur la période 1993-2013.**



Si en théorie une telle étude doit prendre en compte un maximum de paramètres climatiques (températures, précipitations, vent, humidité, évapo-transpiration, etc.), c'est en pratique un objectif irréalisable compte tenu du peu de stations enregistrant ces paramètres, qui plus est sur une période de temps supérieure à la décennie. Les paramètres de ce fait utilisés sont uniquement thermiques et pluviométriques. Il s'agit des températures minimales ( $T_n$  en °C), des températures maximales ( $T_x$  en °C), du

nombre de jours de gel (NjG) et du cumul des précipitations (RR en mm). Pour les données quotidiennes, les paramètres concernent uniquement les Tn, Tx, et RR. Le calcul d'indices bioclimatiques dérivés de ces séries pour la réalisation d'une typologie va permettre de cibler plus spécifiquement les critères climatiques influençant la phénologie et la croissance herbacée, et de ce fait peut pallier quelque peu au manque d'autres variables ou indices climatiques. Enfin, les données issues de la station de Darbounouse via l'Observatoire éco-climatique des Hauts Plateaux du Vercors sont comparées à celles issues de quelques stations du réseau Météo France sur la période allant de l'automne 2005 à fin 2013.



## 2. METHODOLOGIE

La majorité des études de la variabilité spatiale du climat utilisent des méthodes d'interpolation afin de définir le climat en tout point de l'espace. Ces interpolations font appel à des modèles régressifs, qui prennent en compte les paramètres géographiques locaux et permettent ainsi, à partir d'informations ponctuelles, d'aboutir à une information climatique spatiale continue. C'est le cas notamment de Joly *et al.*, (2010), qui ont établi une typologie des climats en France sur la base d'une interpolation dite « locale ». Cette dernière, qui décompose l'interpolation dans un premier temps par polygones, permet d'ajuster le modèle en fonction des facteurs les plus explicatifs des variations locales. Dans sa typologie, 9 variables sont intégrées : altitude, pente, exposition, rugosité topographique, indice d'encaissement/surélévation, rayonnement global théorique, indice de végétation, distance à la forêt et à l'océan ou à la mer. La prise en compte d'un tel nombre d'indicateurs et de paramètres dans cette étude aurait permis la mise en place d'une évaluation climatique plus précise au niveau des alpages. Mais ce type d'étude requiert d'une part une répartition spatialement cohérente des stations et d'autre part, un temps de calcul très long et à forte base statistique, le rendant peu opérationnel et lisible pour les non spécialistes. Les analyses auraient alors été difficilement prises en main et actualisées par les gestionnaires pour un suivi climatique opérationnel des alpages. Enfin, la multiplicité des méthodes existantes, dépendantes et adaptées selon la variable à interpoler (voir entre autres Lhotellier, 2006 ; François et Humbert, 2013) nécessite une étude technique imposante afin d'optimiser et de valider au mieux ces méthodes d'interpolations sur les territoires de montagne.

La méthode employée se concentre donc sur une analyse des régressions linéaires mettant en relation les différents paramètres climatiques retenus par rapport à l'altitude et à l'exposition. Ces modèles permettent d'estimer les gradients thermiques et pluviométriques en fonction des deux variables précédentes. Ils mettent également en évidence les stations sous l'influence d'un climat local fortement dominé par les variations d'altitude et d'exposition, par rapport aux stations dominées a priori par d'autres paramètres (qui, faute de temps, ne seront malheureusement estimés que par rapport à la littérature).

Dans un second temps, la sélection des 14 indices bioclimatiques doit permettre de cibler les climats pouvant influencer les écosystèmes, en particulier à des périodes spécifiques de l'année, selon des seuils thermiques ou pluviométriques prédéfinis. Ces indices servent de variables descriptives essentielles pour établir la typologie des stations, donc a priori des alpages qui leur seront associés. En premier lieu, une ACP couplée à une CAH à partir des moyennes de chaque indice bioclimatique sur la période 1993-2013 pour les 22 stations sélectionnées est réalisée (soit un tableau initial de 14 variables (indices bioclimatiques) et 22 individus (stations)) (Annexe 2). Dans un second temps, seule l'ACP est réalisée, à partir des moyennes annuelles des 21 années de la période 1993-2013 (soit un tableau initial comprenant 14 variables (indices

bioclimatiques) et 462 individus correspondant aux moyennes annuelles de chaque individu sur la période 1993-2013).

## 2.1. LES REGRESSIONS LINEAIRES

Les régressions sont réalisées mois par mois sur les moyennes mensuelles calculées sur la période 1993-2013. Elles mettent en relation les paramètres climatiques suivants : précipitations, températures minimales, températures maximales, et nombre de jours de gel par rapport aux variables « altitude » et « exposition ».

Une première interprétation permet d'analyser par les coefficients de détermination ( $R^2$ , soit la proportion de variance expliquée) l'influence des variables à l'échelle locale. Le test du F de Fisher est utilisé pour tester si la moyenne de la variable suffit à décrire les résultats obtenus ou non (*i.e* si elle apporte une quantité d'information significative). Avec un seuil retenu  $< 0,0001$ , on prend un risque de se tromper de moins de 0,1%.

La seconde interprétation porte sur les gradients altitudinaux, et la troisième sur les résidus issus des régressions bivariées. Plus les résidus tendent vers 0, plus la station est représentative de la relation entre le paramètre climatique testé et la variable. On considère empiriquement représentatives les stations dont le résidu standardisé est compris entre -1 et 1.

## 2.2. SELECTION ET CALCULS DES INDICES BIOCLIMATIQUES

Le choix des indices a été effectué en ajustant des indices issus d'une typologie existante (Joly, 2010) par des indices issus des travaux du WorldClim (données climatiques en accès libre pour la modélisation en écologie, <http://www.worldclim.org/>). Les paramètres bioclimatiques définis par WorldClim sont des dérivés des valeurs de températures et de précipitations qui génèrent des variables synthétiques plus significatives d'un point de vue biologique. Pour les indices utilisés par Joly et al., (2010), le seuil thermique des températures maximales de 30°C significativement valable à l'échelle française ne l'est pas dans les Alpes (seuil défini par les risques sanitaires que son franchissement peut engendrer). Il a donc fallu définir un seuil à partir duquel des dommages sont susceptibles d'être occasionnés. Les plantes alpines sont capables de capter un maximum de chaleur de par leur morphologie, et cette dernière peut se retourner contre elles. C'est ainsi que des stress dus à la chaleur ont été identifiés (Körner, 1999 qui cite Gauslaa, 1984) même pour des températures modérées. Körner (1999) a associé la valeur seuil critique d'endommagement des tissus végétaux à une température de l'air de  $19,2 \pm 1,9^\circ\text{C}$ . Cette valeur concerne des formations végétales de l'étage nival, soit à des altitudes souvent supérieures aux alpages. Gauslaa observe des dommages dus à la chaleur sur *Silene Acaulis* à une température de l'air de 21°C (mais il s'agit d'une espèce en particulier, et ces observations n'ont pas encore été validées pour d'autres espèces). Une valeur seuil de 20°C considérée de manière empirique par rapport à ces observations est définie ici pour le calcul de l'indice thermique des températures maximales. Les indices bioclimatiques sont détaillés dans le tableau n°1.

**TABEAU 1 : Tableau descriptif des 14 indices bioclimatiques utilisés pour établir les typologies.**

<b>Indices thermiques</b>	
I1	Températures moyennes annuelles (°C)
I2	Nombre de jours par an de $T_n < -5^{\circ}\text{C}$
I3	Nombre de jours par an de $T_x > 20^{\circ}\text{C}$
I4	Nombre de jours par an de $T_x < 0^{\circ}\text{C}$
I5	Température maximale du mois le plus chaud (°C)
I6	Température minimale du mois le plus froid (°C)
I7	Amplitude annuelle des températures (I5-I6) (°C)
I8	Saisonnalité des températures (coefficient de variation d'avril à septembre)
<b>Indices pluviométriques (mm)</b>	
I9	Cumul annuel des précipitations
I10	Précipitations du trimestre le plus humide
I11	Précipitations du trimestre le plus sec
I12	Précipitations du trimestre le plus chaud
I13	Précipitations du trimestre le plus froid
I14	Saisonnalité des précipitations (coefficient de variation d'avril à septembre)

Les indices I5 (température maximale du mois le plus chaud), I6 (température minimale du mois le plus froid), I10 (précipitations du trimestre le plus humide), I11 (précipitations du trimestre le plus sec), I12 (précipitations du trimestre le plus chaud), I13 (précipitations du trimestre le plus froid), sont calculés à partir d'analyses de fréquences des mois enregistrant soit les températures les plus chaudes (I5, I12), soit les températures les plus froides (I6, I13), ou soit les mois enregistrant le plus (I10) ou le moins (I11) de précipitations sur l'année pour la période 1993-2013. Les mois retenus sont ceux dont la fréquence au cours de la période 1993-2013 est la plus élevée. Il s'agit des mois de :

- juillet pour la température maximale du mois le plus chaud (sauf Autrans : août)
- février pour la température minimale du mois le plus froid (sauf Avrieux, Embrun et Moutiers, Bourg-St-Maurice : janvier)
- octobre ; novembre ; décembre pour le trimestre le plus humide
- janvier ; février ; mars pour le trimestre le plus sec
- juin ; juillet ; août pour le trimestre le plus chaud
- décembre ; janvier ; février pour le trimestre le plus froid

## 2.3. REALISATION DE LA TYPOLOGIE PAR DES METHODES STATISTIQUES MULTIVARIEES

Le recours aux statistiques multivariées (approche factorielle et classification automatique) se justifie par la nécessité de décrire et de synthétiser des ensembles de variables simultanément. La méthode employée dépend du type de variables à étudier.

Dans ce cas, l'ACP est utilisée du fait de la prise en compte de variables exclusivement quantitatives.

### **2.3.1. L'ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES (ACP)**

L'ACP repose sur les corrélations existantes entre les différentes variables. C'est une méthode factorielle, c'est-à-dire quelle réduit le nombre de variables à étudier afin de faire ressortir de nouvelles variables synthétiques du tableau initial.

Cette analyse est souvent utilisée avant une classification car elle permet l'identification de la structure de l'échantillon et éventuellement la détermination du nombre de groupes (*i.e.* "de classes") à construire. La méthode permet la mise en évidence de structures latentes à l'organisation des données par le biais d'axes factoriels. L'étude de ces axes s'effectuera après avoir brièvement décrit les différentes variables par des indicateurs statistiques descriptifs ; et consiste à interpréter le positionnement des stations et des années sur ces axes. L'analyse des valeurs et vecteurs propres permet de déterminer le nombre d'axes à interpréter.

Méthodologiquement, seules les variables fortement corrélées avec l'axe étudié sont étudiées, c'est-à-dire supérieures ou égales à la valeur absolue de 0,6 en mettant en opposition certaines variables très liées à cet axe. C'est à partir de ces informations qu'il faut essayer de mettre en évidence les structures latentes. Par la suite, la méthode nécessite de regarder le tableau des individus en s'intéressant à ceux présentant de bonnes contributions ainsi qu'une bonne qualité de représentation sur l'axe (proche de 1). En général, des groupes d'individus s'opposent entre eux. Pour déterminer ces oppositions, il faut regarder les coordonnées des individus sur les axes (Sanders L., 1990).

### **2.3.2. LA CLASSIFICATION ASCENDANTE HIERARCHIQUE (CAH)**

Elle vise à réduire le nombre d'individus en formant des groupes (l'objectif étant d'aboutir à une typologie explicite, basée sur une classification objective). Cette typologie repose sur les critères de similarités entre les différents objets, ici nos stations. Elle agglomère les individus les plus proches en un seul (maximisation de la variance inter-classes, et minimisation de la variance intra-classe), et ainsi de suite jusqu'à ne former plus qu'un seul groupe (Chessel et al., 2004). Les résultats seront croisés avec ceux établis précédemment par l'ACP.

L'analyse directe du dendrogramme (ou arbre de classification) permet de différencier graphiquement les différences classes. Cette représentation est composée d'agrégations successives jusqu'au regroupement de tous les individus. La hauteur des branches du dendrogramme quantifie le niveau de proportionnalité entre les deux objets regroupés. Dans le cas de la méthode de Ward qui est appliquée ici (qui répartie de manière relativement équivalente la variance parmi les différentes classes), il est

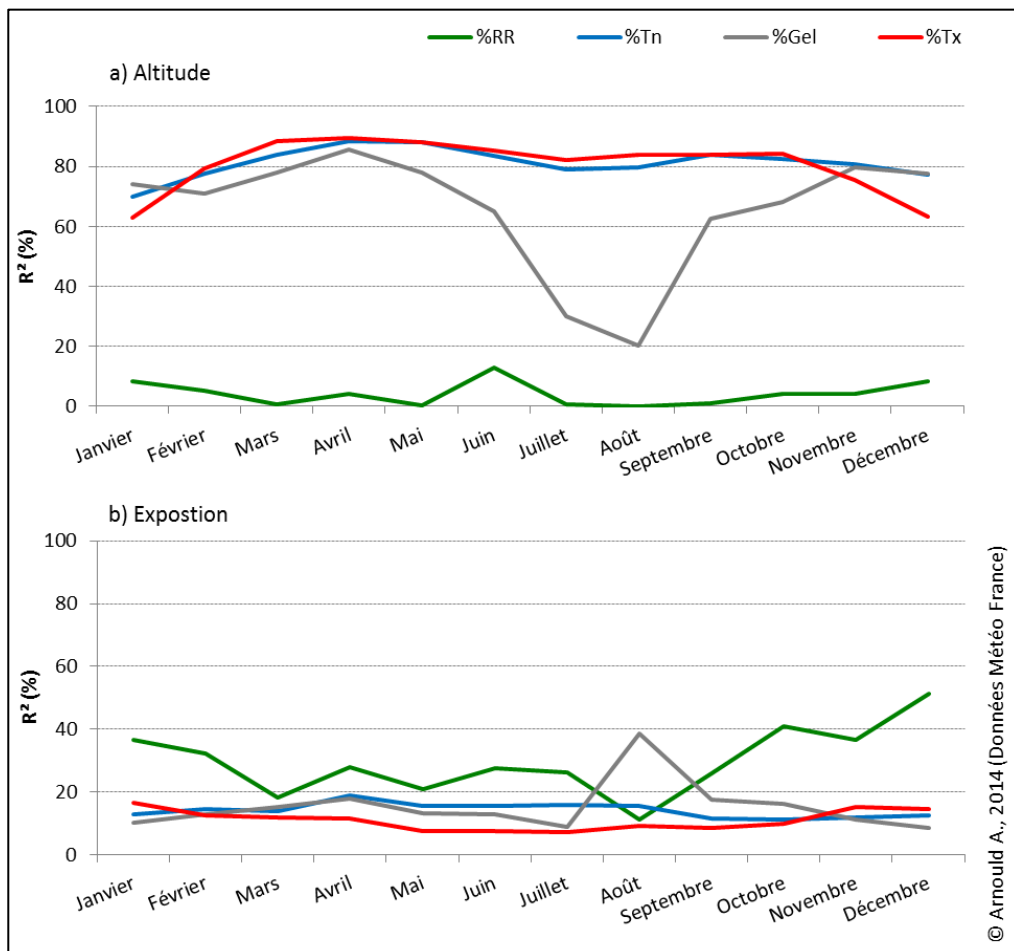
nécessaire de couper (*i.e.* arrêter) la classification, c'est-à-dire définir le nombre de classes que l'on souhaite interpréter avant de perdre trop d'inertie inter-classe qui subviendrait lors du passage à la classe supérieure (ce critère d'arrêt peut être objectif, et donc calculé, ou bien subjectif, c'est-à-dire défini par l'analyste qui détermine le nombre de classes qu'il souhaite interpréter). Ce dernier critère s'applique ici et comprend 3 classes.

## 3. RESULTATS

### 3.1. LES FACTEURS GEOGRAPHIQUES, MARQUEURS DU CLIMAT LOCAL

Les régressions linéaires ont permis d'étudier l'influence de l'altitude et de l'exposition sur la variabilité thermique et pluviométrique des 32 stations Météo France sélectionnées pour l'étude. L'analyse des coefficients de détermination permet d'estimer l'influence des variables sur les climats locaux spécifiques à chaque station. Elle illustre le rôle important que jouent les variations d'altitude sur la variabilité spatiale des températures. Sur la période 1993-2013, l'altitude explique à plus de 60% (souvent plus de 80%) les variations thermiques régionales (Figure 4-a). Elle n'explique jamais plus de 20% des précipitations. En ce qui concerne l'exposition (Figure 4-b), sa contribution à l'explication des variations spatiales des paramètres thermiques et pluviométriques est faible (entre 18 et 51%, principalement en hiver). La variabilité spatiale de ces dernières est la résultante de nombreux facteurs inter-corrélés (continentalité, pente, altitude, exposition, effet d'abris) (Joly, 2011).

**FIGURE 4 : Coefficient de détermination ( $R^2$ ) entre d'une part la variable a) altitude et b) exposition, et d'autre part les paramètres climatiques suivants : précipitations (RR en mm), températures minimales (Tn en °C), températures maximales (Tx en °C) et nombre de jours de gel.**

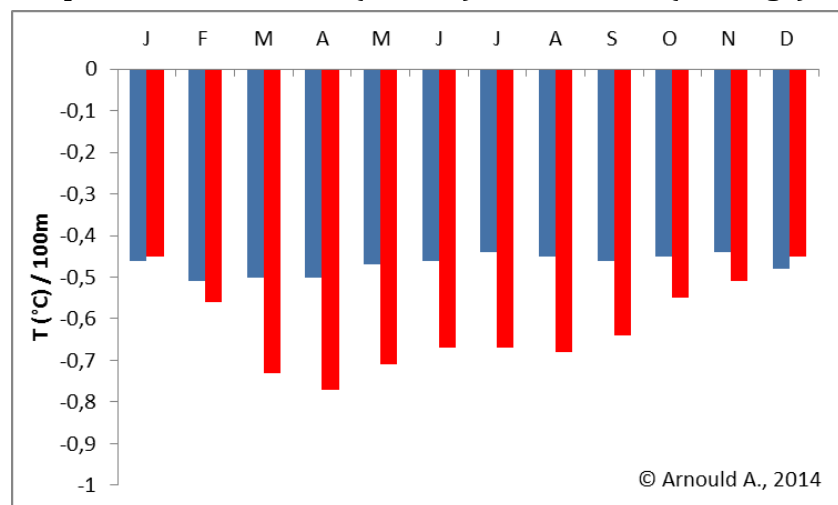


Enfin, si le test de Fisher nous signale un risque de se tromper inférieur à 0.01% pour la variable « altitude », ce n'est pas le cas de pour la variable « exposition » qui présente des risques dépassant les 50%, donc considérée comme peu fiable ici.

Les gradients établis par les modèles de régression sont similaires à ceux préétablis par des études antérieures (Douguedroit et Saintignon, 1974 ; Dumas, 2012). Ils oscillent entre  $-0,4^{\circ}\text{C}$  et  $-0,45^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  (Figure 5) pour les températures minimales, et entre  $-0,4^{\circ}$  et  $-0,78^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  pour les températures maximales.

L'amplitude annuelle du gradient thermique des températures maximales est 8 fois plus importante que celle des températures minimales. Dans une étude récente menée sur les Alpes françaises, Dumas (2012) estimait le gradient des  $T_x$  égal à  $-0,62^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  et celui des  $T_n$  égal à  $-0,46^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  en septembre sur la période 1960-2007. Les résultats

**FIGURE 5: Gradients thermiques issus des modèles de régressions linéaires corrélant l'altitude par rapport aux températures minimales (en bleu) et maximales (en rouge).**



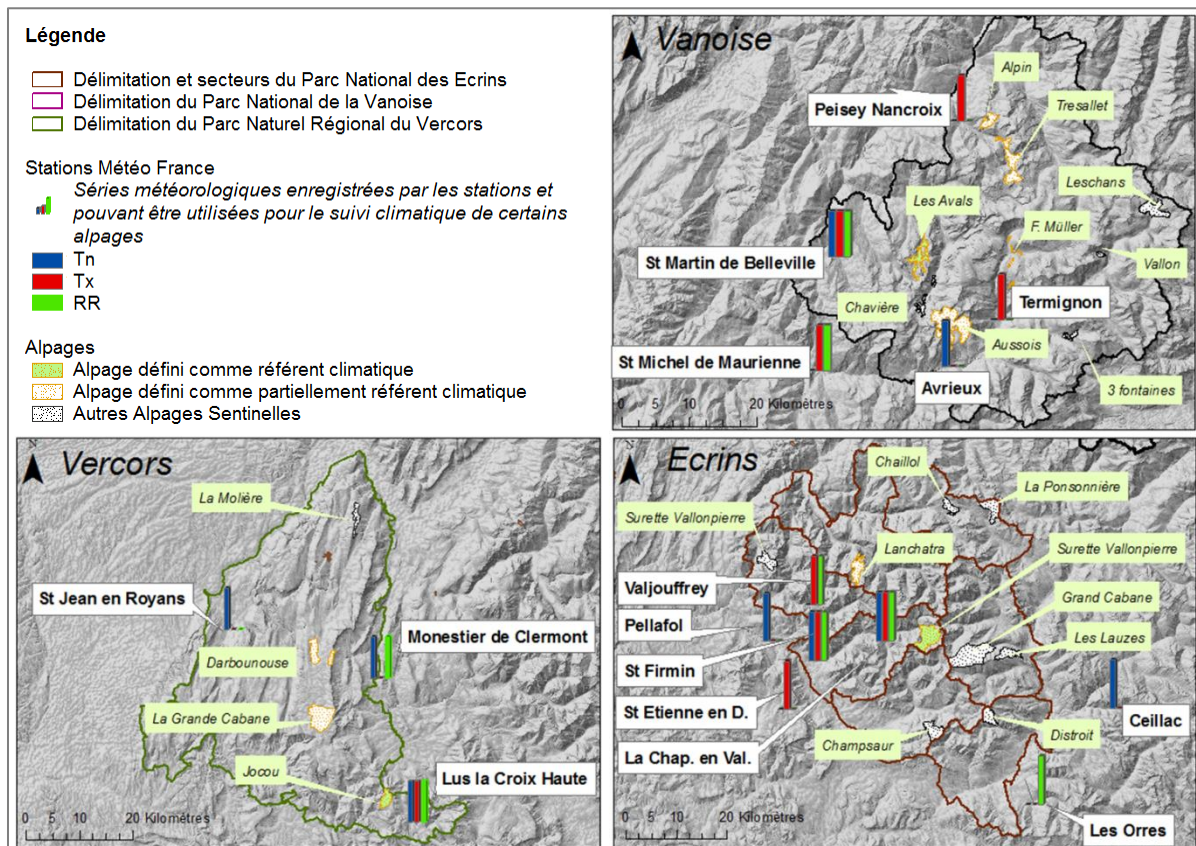
obtenus pour les stations sélectionnées ici semblent concorder avec ces résultats.

L'analyse des résidus issus de la régression permet de répertorier les stations Météo France les plus représentatives de la corrélation entre l'altitude et les paramètres météorologiques. En effet, un résidu positif (*respectivement un résidu négatif*) indique que le modèle sous-estime (*surestime*) la variable météorologique. Autrement dit, lorsque le résidu est positif, les variables mesurées sont supérieures à ce qu'elles devraient être à l'altitude de la station, et vice versa.

Une première approche définissant des stations référentes pour le suivi climatique des alpages est proposée ci-dessous (Figure 6). Cette simple analogie se base sur la meilleure proximité géographique possible de la station vis-à-vis de l'alpage, incluant des critères de proximité induits par les positionnements station/alpage situés dans les mêmes vallées et avec la même exposition. Les stations dont les déclinaisons spatiales des  $T_n$ ,  $T_x$  et  $RR$  sont essentiellement dues aux variations d'altitude se démarquent comme les plus adéquats pour le suivi climatique des alpages. En effet, en ce qui concerne les températures, leurs variations spatiales sont essentiellement contrôlées par l'altitude, réduisant alors le risque de se tromper lorsqu'on extrapole la température de la station à la température de l'alpage à partir des gradients thermiques établis par le modèle de régression.



**FIGURE 6 : Répartition spatiale des paramètres climatiques étant majoritairement justifiés par les variations d'altitude. Les stations ayant comme principal marqueur du climat local les conditions topographiques peuvent servir de stations de référence pour la caractérisation d'un alpage situé à proximité (distance maximale de 15 km).**



Ainsi, la station située à la Chapelle-en-Valgaudemar semble la plus appropriée pour la caractérisation du climat de l'alpage de Surette-Vallonpière dans les Ecrins (distance entre l'alpage et la station : 6 km), celle située à St-Martin-de-Belleville pour l'alpage des Avals (distance de 9,9 km) en Vanoise et la station de Lus-la-Croix-Haute pour l'alpage de Jocu (distance de 6,3 km) dans le massif du Vercors.

Une analyse plus fine permet de sélectionner d'autres stations pouvant contribuer au suivi des alpages, mais uniquement à partir de certains paramètres climatiques (Tn, Tx ou RR). C'est le cas de Valjouffrey dans les Ecrins, Peisey-Nancroix, Termignon et Avrieux en Vanoise et Monestier-de-Clermont et St-Jean-en-Royans dans le Vercors. Toutes ces stations sont détaillées dans le tableau 2. Enfin, les stations de Pellafol, St Firmin, St Etienne, Les Orres et Ceillac (Ecrins) et St-Michel-en-Maurienne (Vanoise) sont situées trop loin des alpages (minimum 16 km dans les Ecrins, 20 km en Vanoise) et ne sont pas retenues comme référentielles d'un alpage. Au-delà de 15 km, les stations sont localisées dans des vallées adjacentes et/ou dans selon une exposition inversée de type ubac/adret.



**TABEAU 2 : Stations retenues et leur(s) paramètre(s) climatique(s) associés pour le suivi climatique des Alpes Sentinelles. La distance correspond à l'éloignement de la station par rapport à l'alpage (en km).**

MASSIF	STATION	PARAMETRES CLIMATIQUES	ALPAGE	DISTANCE
<b>Ecrins</b>	La Chapelle-en-Valgaudemar	Tn, Tx, RR	Surette-Vallonpierre	6
	Valjouffrey	Tx, RR	Lanchatra	9
<b>Vanoise</b>	St-Martin-de-Belleville	Tn, Tx, RR	Les Avals	9,9
	Peisey-Nancroix	Tx	Alpin	3,1
			Tressalet	6,5
	Termignon	Tx	F. Müller	5,1
			Aussois	4,5
	Avrieux	Tx	Aussois	2,8
<b>Vercors</b>	Lus-la-Croix-Haute	Tn, Tx, RR	Jocou	6,3
	Monestier-de-Clermont	Tn, Tx	La Grande Cabane	10,2
			Darbounouse	10,1
	St-Jean-en-Royans	Tn	Darbounouse	14,1

### 3.2. L'EVOLUTION CLIMATIQUE RECENTE (1993-2013)

L'analyse de l'évolution climatique sur la période 1993-2013 à partir des trois meilleures stations définies précédemment comme référentielles d'alpages donne un aperçu de la variabilité climatique interannuelle régionale. Avec une température moyenne de 6,2°C, St-Martin-de-Belleville (1500 m) est la station enregistrant les températures les plus froides, en comparaison avec à Lus-la-Croix-Haute (8,78°C pour une altitude de 1059 m) et la Chapelle-en-Valgaudemar (7,42°C pour une altitude de 1270 m). Ces différences se justifient par le gradient altitudinal des températures définis précédemment par les régressions linéaires (moyenne de 0,59°C/100 m). En ce qui concerne les précipitations, la Chapelle-en-Valgaudemar s'identifie par le cumul pluviométrique annuel le plus élevé des trois stations sur la période 1993-2013, avec un total de 1298 mm, contre 1141 mm à Lus-la-Croix-Haute et 905 mm à St-Martin-de-Belleville. Dans ce cas, le gradient Est-Ouest des précipitations ne justifie pas la différence entre Lus-la-Croix-Haute et la Chapelle-en-Valgaudemar.

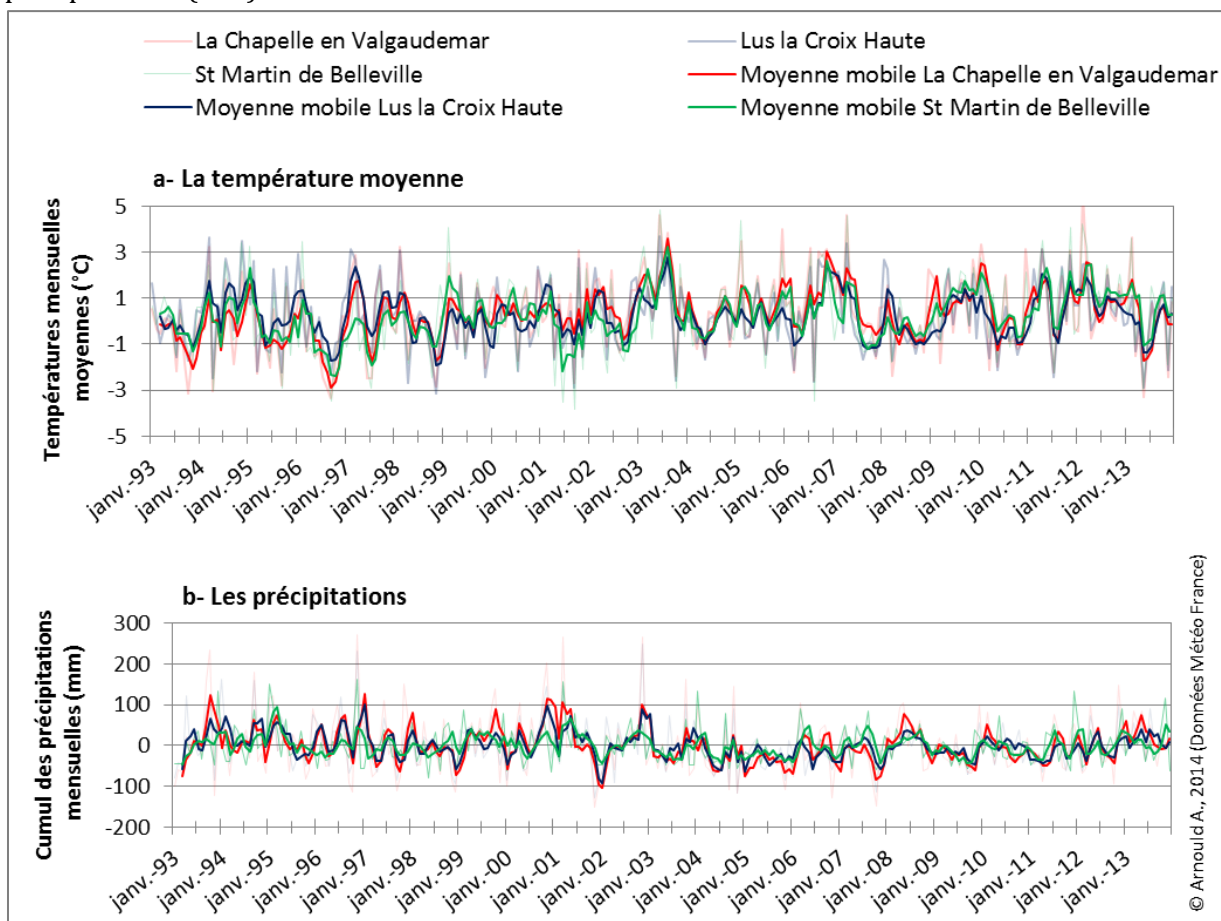
Avec des écarts à la moyenne (lissés selon une moyenne mobile de 3 mois) positifs supérieurs à 1°C, les années 1994, 1997 (uniquement les mois de janvier, février et mars), 2003 (sauf les mois d'octobre, novembre, décembre), 2007 (janvier, février, mars), 2009, 2011 et 2012 (janvier et février uniquement pour ces deux années) apparaissent comme extrêmes thermiques (Figure 7a). En 2003, les écarts à la moyenne atteignent 3°C, avec les mois de juillet, août et septembre qui sont les plus concernés par ces extrêmes thermiques. La fréquence d'apparition de ces derniers en hiver est moindre. Des écarts négatifs supérieurs à 2°C sont remarqués en début d'année civile 2007, fin 2009 ainsi que durant les hivers 2010/2011 et 2011/2012. Les années

présentant des écarts à la moyenne négatifs supérieurs à 1°C sont 2003 (novembre, décembre), ainsi que l'année 2007 (durant l'été).

En ce qui concerne les précipitations, on observe une diminution de la variabilité interannuelle, notamment à partir de 2003 (Figure 7b). Aussi, on observe une augmentation de la fréquence d'apparition des mois enregistrant des écarts à la moyenne négatifs lors de la deuxième décennie (2003/2013). Ces écarts sont le plus souvent enregistrés aux mois de janvier et février. C'est le cas en 1999, 2002, 2005, 2006, 2007, 2008, 2010. Ce seuil est atteint en été en 2004, 2006 et 2001.

A l'inverse, les hivers 1993/1994, 2006/2007, 2000/2001 et les mois de novembre et décembre 2003 sont caractérisés par des extrêmes pluviométriques importants, allant jusqu'à 100 mm/mois.

**FIGURE 7: Variations climatiques interannuelles des écarts à la moyenne (1993-2013)** de 3 stations Météo France des Alpes (La Chapelle-en-Valgaudemar, 1270 m, massif des Ecrins ; Lus-la-Croix-Haute, 1059 m, massif du Vercors ; St-Martin-de-Belleville, 1500 m, massif de la Vanoise pour a) les températures moyennes mensuelles (°C) et b) le cumul mensuel de précipitations (mm).



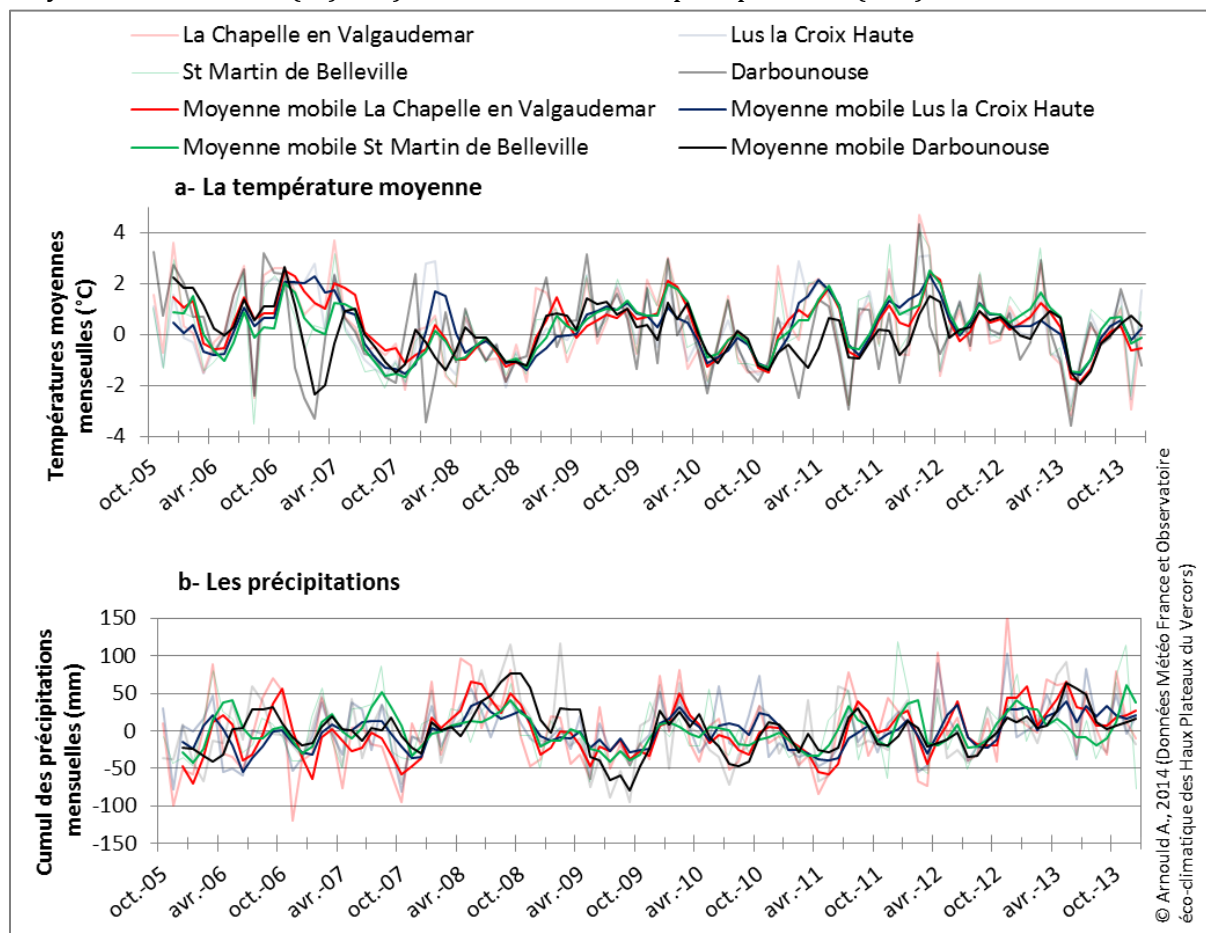
Le comparatif entre les stations de la-Chapelle-en-Valgaudemar, Monestier-de-Clermont, Lus-la-Croix-Haute et la station éco-climatique de Darbounouse est effectué à partir des écarts à la moyenne lissés selon une moyenne mobile de 3 mois. La variabilité

interannuelle des températures moyennes est fortement similaire à celles des 3 stations Météo France, exception faite de l'année 2010, où une anomalie négative de 1°C est observée, alors que pour les autres stations cette anomalie est positive (jusqu'à 2°C) (Figure 8a).

Une différence importante est également observée en 2006, avec des écarts à la moyenne fortement négatifs à Darbounouse, contrairement aux autres stations qui enregistrent des écarts à la moyenne positifs. Enfin, les années extrêmes observées sont les mêmes, excepté à la fin de l'année 2007, où les stations présentent toutes un positionnement différent par rapport à la moyenne.

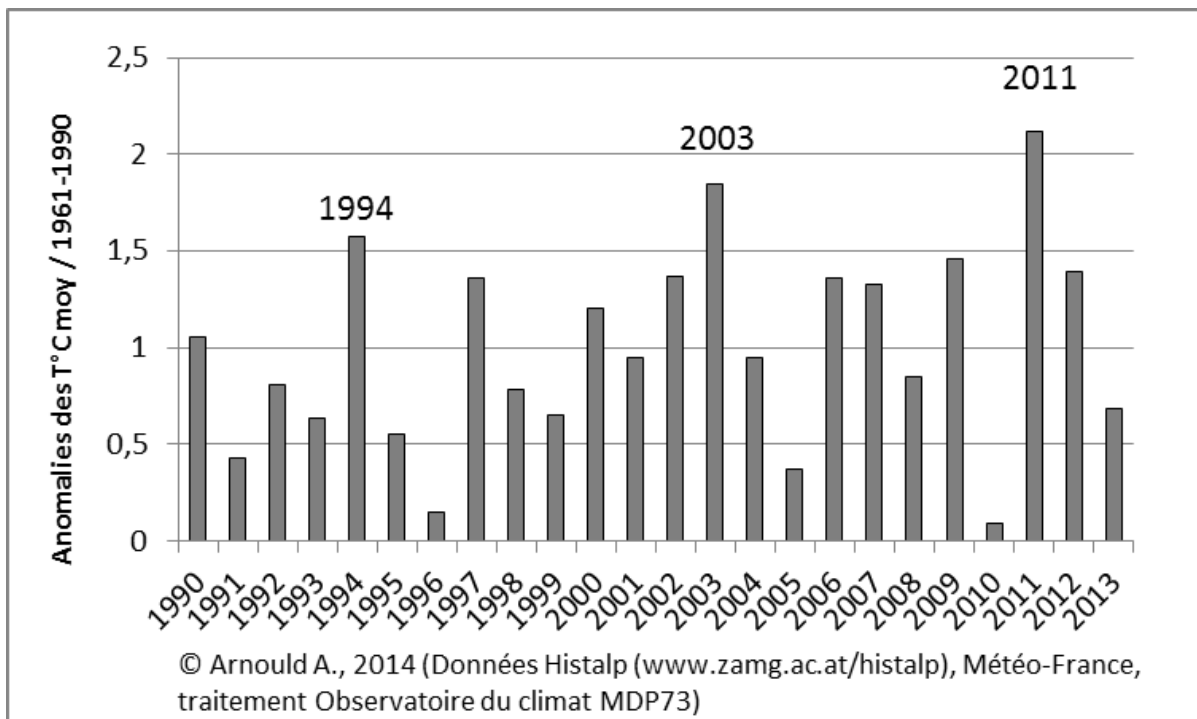
Les anomalies pluviométriques calculées pour la station de Darbounouse mettent en évidence une plus grande amplitude des années extrêmes, qu'elles soient dues à un excès ou à un déficit hydrique (Figure 8b). C'est le cas notamment en 2008 et 2009, où se sont succédées une période humide (+ 75 mm) et une période sèche (-75 mm). En 2006 et 2010, des extrêmes pluviométriques plus importants sont également observés.

**FIGURE 8 : Variations climatiques interannuelles des écarts a la moyenne (2005-2013) de 3 stations Météo France des Alpes (La Chapelle-en-Valgaudemar, 1270 m, massif des Ecrins ; Lus-la-Croix-Haute, 1059 m, massif du Vercors ; St-Martin-de-Belleville, 1500 m, massif de la Vanoise et de la station éco-climatique de Darbounouse (Vercors) pour a) les températures moyennes mensuelles (°C) et b) le cumul mensuel de précipitations (mm).**



Les années extrêmes ainsi mises en évidence sont les mêmes que celles des anomalies de températures moyennes annuelles sur les Alpes françaises, calculées à partir des séries climatiques HISTALP par rapport à la période de référence 1961-1990 (Figure 9). Néanmoins, l'année 2013, caractérisée par un écart à la moyenne supérieur à 2°C à l'échelle des Alpes françaises, n'apparaît pas comme une année extrême auprès des 4 stations de cette étude. L'étude de l'année 2011 a montré que les températures ne présentaient pas d'écarts à la moyenne significatifs, mais plutôt un déficit pluviométrique.

**FIGURE 9: Anomalies des températures moyennes annuelles** calculées à partir des séries climatiques homogénéisées HISTALP des Alpes françaises par rapport à la période de référence 1961-1990.



### **3.3. TYPOLOGIE DES CLIMATS LOCAUX**

#### **3.3.1. LES CONDITIONS GEOGRAPHIQUES COMME MARQUEURS DES CLIMATS LOCAUX**

L'analyse descriptive des moyennes par station de chaque indice sur la période 1993-2013 met en évidence les stations enregistrant les valeurs les plus extrêmes en termes de température et de pluviométrie. Considérons dans un premier temps les indicateurs thermiques. La station située à Lanslebourg (2000 m) enregistre les températures moyennes les plus froides avec une moyenne de 3.06°C, tandis que la station enregistrant les températures les plus chaudes est St-Jean-en-Royans (308 m) avec 12.13°C en moyenne. L'altitude comme facteur explicatif de cette variabilité thermique est d'autant plus probable que le gradient thermique expliquant une telle différence (0.51°C/100 m) est du même ordre que les gradients moyens de températures sur les massifs issus de l'analyse des régressions linéaires (0.54°C/100 m). Pour ce qui est des indicateurs pluviométriques, les précipitations annuelles les plus faibles sont enregistrées à Avrieux (574.56 mm), contrairement à Autrans qui cumule sur une année 3 fois plus de précipitations que la moyenne régionale. De manière générale, les précipitations sont moins abondantes en Vanoise que sur les autres massifs (moyenne de 835 mm en Vanoise, 1191 mm dans le Vercors et 987 mm dans les Ecrins). Le gradient Est-Ouest pourrait expliquer une telle différence.

L'analyse porte sur les trois premiers axes, qui expliquent 84.6% de l'information initiale contenue dans le nuage de point.

Le premier axe oppose deux groupes de variables (Figure 10). D'une part le nombre de jours/an de  $T_n < -5^\circ\text{C}$ , le nombre de jours/an de  $T_x < 0^\circ\text{C}$  et le coefficient de variation d'avril à septembre avec de fortes corrélations. D'autre part les températures moyennes annuelles, le nombre de jours/an de  $T_x > 20^\circ\text{C}$ , les températures maximales atteintes sur une année et les précipitations du trimestre le plus humide. Cet axe différencie les stations de par leurs caractéristiques thermiques (températures inférieures ou supérieures à la moyenne globale de toutes les stations, autrement dit la moyenne régionale des 3 massifs). L'analyse des coordonnées des stations permet d'établir des corrélations. Les stations présentant des valeurs négatives (St Firmin, Moutiers, St-Jean-en-Royans) sont à associer avec les indices présentant également des corrélations négatives, et vice versa. On obtient donc une différenciation des stations selon les critères suivants : les stations de Ceillac, Bessans, et Lanslebourg sont caractérisées par de nombreux jours de  $T_n < -5^\circ\text{C}$  et de  $T_x < 0^\circ\text{C}$  par rapport à la moyenne de toutes les stations. A l'extrémité de l'axe, les stations de St Firmin, Moutiers et St Jean en Royans sont caractérisées par des indices thermiques traduisant des températures supérieures aux moyennes enregistrées de 1993 à 2013.

Le second axe (Figure 10) doit pouvoir en évidence des informations non expliquées par le facteur précédent. Même si les variables présentent toutes des corrélations

positives, l'analyse de la répartition de toutes les stations sur l'axe permet de confirmer que l'axe différencie les stations selon leur régime pluviométrique. Les stations ayant de fortes corrélations positives, comme c'est le cas des stations situées à la Chapelle-en-Valgaudemar, Autrans et Pralognan, sont portées par les 5 indicateurs pluviométriques. Elles sont les stations recevant le plus de précipitations annuelles, contrairement aux stations situées à l'opposé de l'axe.

Enfin, le troisième et dernier axe étudié met en opposition l'amplitude annuelle des températures avec les températures minimales atteintes sur une année. Lorsqu'on analyse les données du tableau initial, on peut en déduire que l'axe 3 différencie les stations en fonction de l'amplitude thermique annuelle de leurs températures. Ainsi, les stations présentant des corrélations positives sont celles connaissant les plus forts écarts annuels tandis que celles moins soumises aux grands écarts d'amplitude présentent des corrélations négatives.

De ces différentes observations peut être effectué un regroupement des stations. D'abord, en considérant uniquement les axes F1 et F2, on peut identifier 4 groupes principaux :

- Groupe 1 : Stations caractérisées par de fortes précipitations par rapport à la moyenne 1993-2013 et des températures légèrement inférieures à la moyenne. Ces stations sont Autrans et La Chapelle-en-Valgaudemar.
- Groupe 2 : Stations caractérisées par des températures nettement supérieures à la moyenne. Les précipitations correspondent à la moyenne régionale. Ces stations sont Bourg-St Maurice, St-Jean-en-Royans, Moutiers
- Groupe 3 : Stations caractérisées par des températures nettement inférieures à la moyenne. Comme pour le groupe 2, les précipitations équivalent à la moyenne régionale 1993-2013. Ces stations sont Bessans et Lanslebourg.

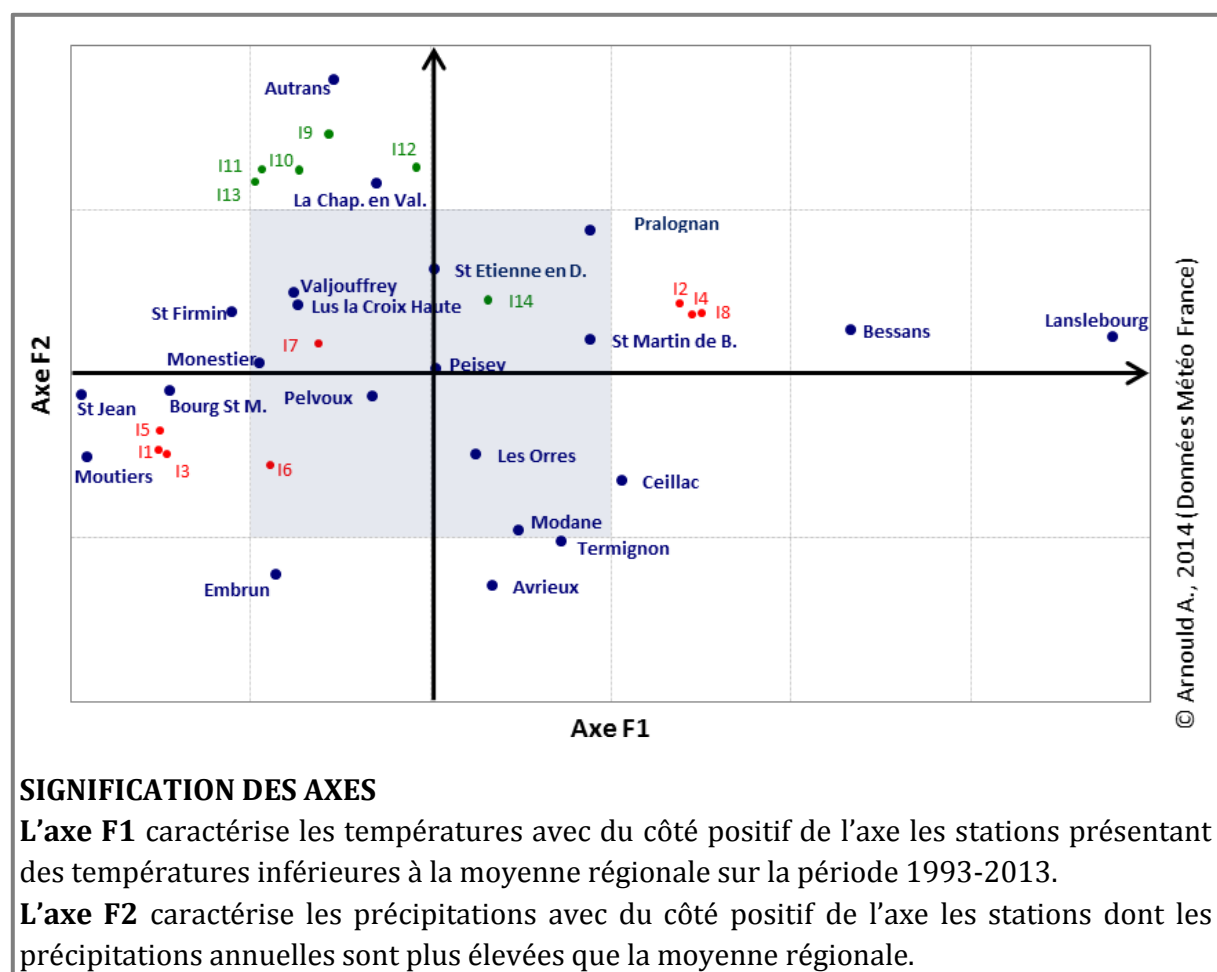
Enfin les stations d'Embrun, Termignon et Avrieux, bien qu'elles ne forment pas un groupe nettement identifiable, se démarquent des autres stations par des précipitations peu abondantes.

En combinant ces interprétations avec les informations résumées par le troisième axe, il est possible d'enrichir les caractéristiques des groupes par la variable « amplitude thermique ». Lorsqu'on étudie les coordonnées des stations sur les axes F2 et F3, il peut apparaître l'idée que les stations présentant de faibles amplitudes thermiques sont également caractérisées par des précipitations moins abondantes que la moyenne. L'analyse du tableau initial ne confirme cependant pas l'hypothèse.



La différenciation des groupes thermiques est potentiellement la résultante des variations altitudinales. Il ne semble pas que des effets locaux interfèrent à long terme sur les variations spatiales des températures. La différenciation des groupes pluviométriques laisse suggérer la continentalité comme facteur responsable des variations pluviométriques. Les stations situées le plus au Nord et à l'Est sont les moins touchées par les précipitations liquides. Les stations comme Embrun, Avrieux et Termignon, qui sont localisées dans des larges vallées, apparaissent caractéristiques des températures moyennes régionales.

**FIGURE 10 : Représentation des variables (22 stations Météo France des Alpes françaises) et des individus (14 indices bioclimatiques) sur le plan des axes F1 et F2 obtenus par ACP à partir des moyennes de chaque indice sur la période 1993-2013.**



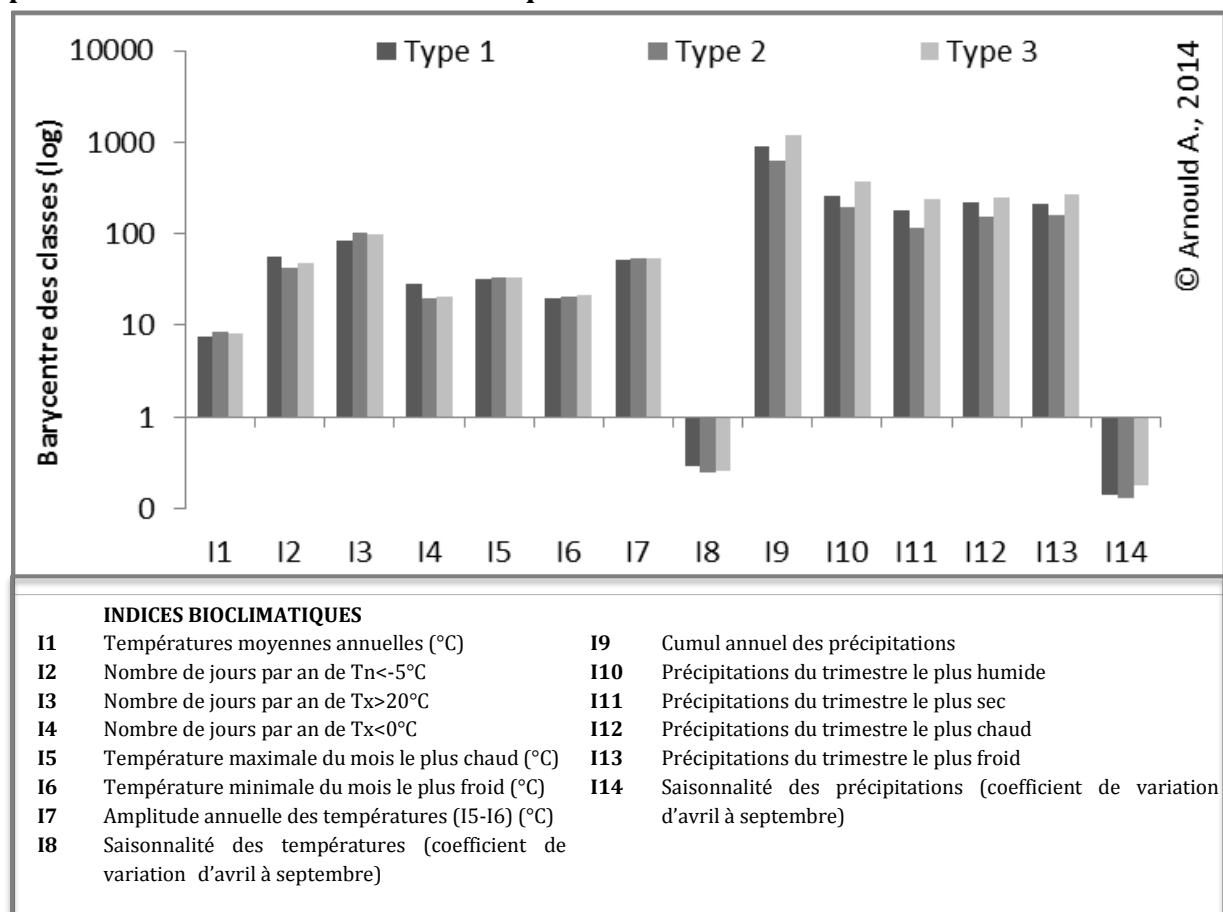
L'utilisation de la CAH va permettre d'identifier des groupes de stations, lesquels seront mis en analogie avec les groupes identifiés par l'ACP.

La CAH laisse apparaître un découpage des stations selon des classes dont le tableau n°3 donne la répartition. L'analyse des barycentres des classes issus de la CAH (Figure 11) permet de caractériser la distribution des indices bioclimatiques selon les classes et donc d'établir des correspondances entre les classes et les caractéristiques climatiques attenantes.

**TABLEAU 3 : Regroupement des stations météorologiques en 3 classes définies par la CAH et basé sur des critères de proximité à partir des indices bioclimatiques sur la période 1993-2013.**

Classe 1	Classe2	Classe 3
Bessans (PNV) Ceillac (PNE) Les Orres (PNE) Bourg-St-Maurice (PNV) Lanslebourg (PNV) Monestier (PNRV) Moutier (PNV) Peisey-Nancroix (PNV) Pelvoux (PNE) St Martin-de-Belleville (PNV)	Avrieux (PNV) Embrun (PNE) Modane (PNV) Termignon (PNV)	Autrans (PNRV) La-Chapelle-en-Valgaudemar (PNE) Lus-la-Croix-Haute (PNRV) Pralognan (PNV) St Etienne-en-Dévoluy (PNE) St Firmin (PNE) St Jean-en-Royans (PNRV) Valjouvrey (PNE)

**FIGURE 11: Distribution des types (groupes) de stations en fonction de leur barycentre pour chacun des 14 indices bioclimatiques.**

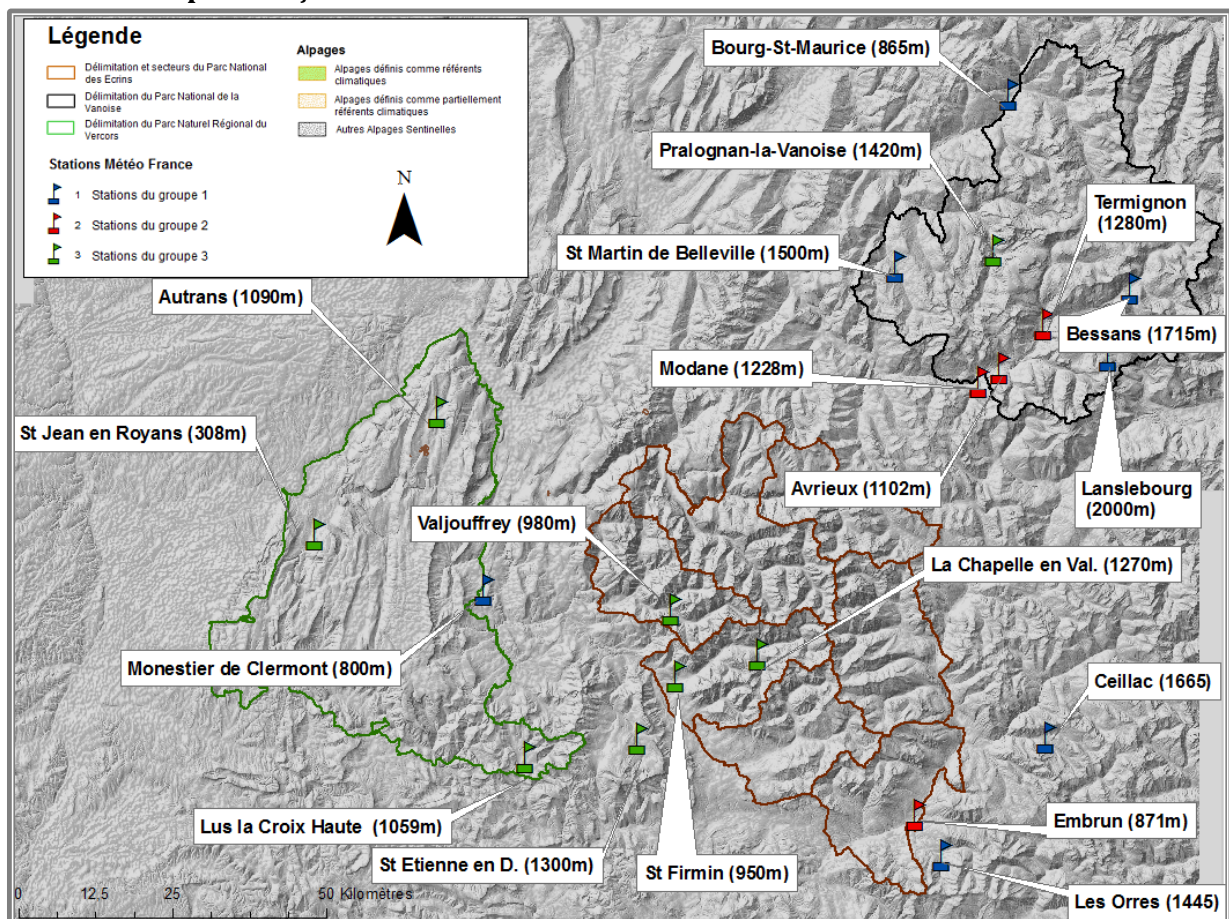


Les informations sont confirmées par l'analyse conjointe des barycentres des classes et l'analyse descriptive du tableau initial qui permet de valider les hypothèses. On peut déterminer que (Figure 12) :



- Les stations rattachées à la classe n°1 enregistrent des précipitations moyennes. Bien que les températures soient essentiellement plus froides que la moyenne régionale, elles sont majoritairement contrôlées par les variations d'altitude.
- La classe 2 met en évidence des stations enregistrant des anomalies pluviométriques négatives par rapport à la moyenne régionale sur la période 1993-2013, laissant suggérer un effet de continentalité. La localisation de ces stations dans de larges vallées peut contribuer à l'augmentation des températures diurnes et ainsi expliquer certaines valeurs thermiques élevées.
- Les stations du groupe 3 se caractérisent par des anomalies pluviométriques positives. Les températures parfois élevées s'expliquent par la faible altitude de certaines stations, amenant la moyenne du groupe à des valeurs proches de celles des autres groupes.

**FIGURE 12 : Répartition des différents groupes issus de la CAH obtenue à partir de la moyenne sur la période 1993-2013 d'indices bioclimatiques pour 22 stations Météo France des Alpes françaises.**



## CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES DES GROUPES

Groupe 1 : caractérisé par des précipitations moyennes et températures froides.

Groupe 2 : caractérisé par des faibles précipitations et des températures chaudes.

Groupe 3 : caractérisé par de fortes précipitations et des températures moyennes.

### **3.3.2. LA VARIABILITE INTERANNUELLE, GENERATRICE D'INFORMATIONS SUR LA REPONSE CLIMATIQUE DES STATIONS AUX ANNEES EXTREMES**

L'ACP réalisée à partir des moyennes annuelles des indices bioclimatiques pour chaque station permet d'intégrer la variabilité interannuelle caractérisant ces dernières. L'analyse descriptive des moyennes annuelles de chaque indice sur la période 1993-2013 met en évidence les stations enregistrant les valeurs (années) les plus extrêmes en termes de températures et de pluviométrie. Considérons dans un premier temps les indicateurs thermiques. Les stations enregistrant les températures moyennes les plus élevées sont St-Jean-Royans (12,7°C de moyenne des températures sur la période 1993-2013), Moutier (11,6°C), Bourg-St-Maurice (10,35°C) et Embrun (10,9°C). A contrario, Bessans, avec 3,24°C de moyenne des températures, Lanslebourg (3, 1°C), Pralognan (5,7°C) et St-Martin de Belleville (6,24°C) enregistrent les températures les plus froides (moyenne régionale de 8°C) (Tableau 4). Ces stations sont toutes localisées dans les Ecrins, et leur altitude varie de 1420 m (St-Martin-de-Belleville) à 2000 m (Lanslebourg). Les variations d'altitude justifient de telles différences. En ce qui concerne les indices pluviométriques, la Chapelle-en-Valgaudemar (avec une moyenne de 1298 mm sur la période 1993-2013) et Autrans (1503 mm) cumulent le plus de précipitations quelle que soit l'année étudiée, alors que la moyenne régionale est de 962 mm (Tableau 4).

L'analyse portera sur les trois premiers axes, qui expliquent 72,47% de l'information contenue dans le nuage de point. Le premier axe oppose deux groupes de variables (Figure 13). Du côté positif de l'axe sont positionnés les indices I1, I3, I5, I6 équivalents respectivement aux températures moyennes annuelles, aux nombres de jours avec des  $T_x > 20^\circ\text{C}$ , aux températures maximales du mois le plus chaud et aux températures minimales du mois le plus froid. De côté négatif se positionnent les indices I2, I4 et I8, équivalents aux nombres de jours avec des  $T_n < -5^\circ\text{C}$  et des  $T_x < 20^\circ\text{C}$  et à la saisonnalité des températures. Cet axe regroupe donc les stations en fonction de leurs caractéristiques thermiques. Le second axe synthétise les informations relatives aux précipitations, comme en témoigne le positionnement des indices I9, I11 I12 et I13 (respectivement cumul annuel des précipitations, cumul des précipitations du trimestre le plus humide, cumul des précipitations du trimestre le plus chaud et cumul des précipitations du trimestre le plus froid) sur le côté positif de l'axe. Les stations regroupées autour de ces indices sont caractérisées par des cumuls pluviométriques annuels plus élevés que la moyenne régionale. Enfin, le troisième axe interprété regroupe les stations en fonction de leur amplitude thermique. Les stations situées du côté positif de l'axe présentent des amplitudes élevées contrairement à celles situées du côté négatif qui témoignent d'une faible amplitude annuelle des températures. Les stations qui ne sont pas « rattachées » à ces différents groupes correspondent aux stations dont les moyennes annuelles se rapprochent de la moyenne annuelle régionale.

Le tableau 5 synthétise les années extrêmes positionnées sur les axes et répartis au sein des différents groupes. Avec le tableau 6 des écarts à la moyenne des stations par rapport à la période 1993-2013, il permet une mise en évidence rapide des caractéristiques climatiques des différents groupes. Cette répartition s'effectue sur la base du croisement des axes factoriels entre eux (F1 et F2 puis F2 et F3). Le positionnement des stations sur les différents axes permet de définir 4 groupes caractéristiques (Figure 14) :

- Groupe 1 : précipitations plus abondantes que la moyenne régionale, températures moyennes ;
- Groupe 2 : températures plus élevées que la moyenne régionale et précipitations légèrement moins abondantes ;
- Groupe 3 : températures moins élevées que la moyenne régionale et précipitations légèrement moins abondantes.

Un quatrième groupe identifié par des températures moyennes et des précipitations faibles peut-être identifié, mais il ne regroupe que 6 individus.

**TABLEAU 4: Moyennes annuelles de chaque indice bioclimatique calculées à partir des séries de 22 stations Météo France des Alpes françaises et utilisées pour établir une typologie des stations selon la variabilité interannuelles des paramètres thermiques (en °C) et pluviométriques (en mm) sur la période 1993-2013.**

Année	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	I10	I11	I12	I13	I14
1993	7,62	47,32	79,23	21,05	29,33	-15,23	44,56	0,30	1021,70	367,26	51,97	226,16	191,33	0,47
1994	8,56	36,32	93,23	15,45	31,44	-12,25	43,69	0,42	1109,62	268,90	182,56	213,12	228,73	0,60
1995	7,55	48,73	80,68	22,59	31,38	-16,00	47,38	0,36	1125,60	223,35	399,52	155,28	443,81	0,55
1996	7,14	49,18	68,77	24,73	27,50	-15,09	42,59	0,29	1089,34	437,46	160,39	311,15	209,47	0,49
1997	8,44	36,32	97,18	13,59	26,58	-10,91	37,49	0,30	836,94	277,65	132,85	270,75	224,10	0,57
1998	7,77	53,73	88,64	21,18	30,55	-13,17	43,72	0,36	836,97	191,75	172,10	178,64	154,04	0,58
1999	7,67	57,36	93,36	34,82	29,68	-18,49	48,17	0,32	1155,14	313,87	273,26	251,51	326,39	0,33
2000	8,03	44,23	92,41	19,05	30,31	-13,47	43,78	0,28	1087,06	426,26	161,44	221,25	150,52	0,47
2001	7,77	49,55	87,27	25,59	28,53	-15,02	43,55	0,39	1020,55	129,22	340,78	230,05	156,10	0,38
2002	8,20	31,64	77,14	11,86	28,10	-13,08	41,19	0,33	1180,07	409,00	187,98	300,93	193,24	0,49
2003	8,68	57,18	115,59	28,05	31,55	-16,14	47,69	0,35	773,72	297,95	147,32	153,21	189,28	0,47
2004	7,87	52,82	100,36	25,55	30,85	-15,39	46,24	0,33	784,10	261,23	235,15	181,29	280,05	0,76
2005	7,37	80,36	96,55	45,27	31,85	-17,61	49,46	0,31	702,53	183,99	121,21	186,70	155,31	0,45
2006	8,52	52,91	101,77	19,91	30,30	-14,55	44,85	0,32	843,97	172,46	218,45	197,20	154,66	0,46
2007	8,24	38,77	94,64	16,18	29,20	-12,93	42,14	0,20	866,45	185,01	232,76	243,51	255,81	0,62
2008	7,90	46,77	83,55	17,68	28,95	-12,12	41,07	0,31	1125,34	264,92	214,52	259,93	213,70	0,42
2009	8,45	56,00	109,91	24,73	31,00	-16,57	47,58	0,27	787,01	285,60	172,83	170,78	257,11	0,46
2010	6,90	73,18	87,59	40,36	29,15	-16,46	45,62	0,36	940,13	279,28	215,78	201,15	238,87	0,61
2011	9,03	34,23	108,91	14,00	29,25	-12,32	41,57	0,18	877,56	324,60	106,21	278,74	229,49	0,54
2012	8,39	49,59	107,68	30,18	30,60	-20,34	51,23	0,33	990,26	379,25	112,37	160,98	238,74	0,52
2013	7,70	58,27	91,36	26,73	30,64	-14,62	45,26	0,35	1061,99	346,05	214,38	195,59	193,54	0,49
<b>Moyenne (1993/2013)</b>	<b>7,99</b>	<b>50,21</b>	<b>93,13</b>	<b>23,74</b>	<b>29,85</b>	<b>-14,85</b>	<b>44,71</b>	<b>0,32</b>	<b>962,67</b>	<b>286,91</b>	<b>193,04</b>	<b>218,47</b>	<b>223,06</b>	<b>0,51</b>

L'analyse de l'axe F3 permet de faire ressortir une information supplémentaire. Il est observé que les précipitations et les amplitudes thermiques étaient corrélées entre elles de manière uniquement positive ou négative (cas le plus fréquent) (Sauf Termignon et Autrans ou les 4 cas de figure sont possibles). Autrement dit, les faibles amplitudes thermiques sont associées à de faibles précipitations, et inversement.

L'analyse de la répartition des stations dans le nuage de point laisse apparaître une fois de plus l'altitude comme facteur caractéristique de la répartition spatiale des températures, tout comme l'a démontré l'ACP réalisée à partir des moyennes sur la période 1993-2013. Les stations situées à Autrans, la Chapelle-en-Valgaudemar et Lus-la-Croix-Haute, contrairement à Avrieux, Modane et Termignon sont soumises au maximum de cumul de précipitations. Le gradient pluviométrique de continentalité peut justifier un tel constat. Une fois encore, les stations qui n'apparaissent pas dans la classification sont des stations dont les paramètres climatiques ne présentent aucune anomalie significative.

**TABEAU 5 : Répartition des stations et années dans les différents groupes obtenus par Analyse en Composantes Principales à partir des moyennes annuelles de chaque indice pour 22 stations Météo France des Alpes françaises sur la période 1993-2013.**

<b>1</b>	Autrans	1993, 1994, 1995, 1996, 1999, 2001, 2002, 2007, 2013
	La Chapelle-en-Valgaudemar	1995, 1996, 1997, 1999, 2000, 2002
	Lus-la-Croix-Haute	1996
	St-Etienne-en-Dévoluy	1996
<b>2</b>	Bourg-St-Maurice	2007, 2011
	Embrun	1998, 2005, 2007, 2011
	St-Jean-en-Royans	1993, 1994, 1995, 1998, 1999, 2000, 2002, 2003, 2004, 2006, 2007, 2008, 2009, 2011, 2013
	Moutiers	1993, 1995, 1996, 1997, 2003, 2004, 2007, 2008, 2009, 2011, 2013
<b>3</b>	Bessans	1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2003, 2005, 2006, 2008, 2009, 2010, 2012, 2013
	Lanslebourg	1993, 1994, 1995, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2003, 2005, 2006, 2008, 2009, 2010, 2012, 2013
	Pralognan	1995, 1999
<b>4</b>	Avrieux	2003, 2005, 2010
	Modane	2005
	Termignon	2005, 2010

Les années qui caractérisent le mieux le groupe 1 sont les années dont le cumul pluviométrique est supérieur à la moyenne régionale (en moyenne 586 mm cumulés à l'année par rapport à la moyenne régionale qui est de 962,6 mm). Les années appartenant à la première décennie de notre étude sont majoritaires dans ce groupe. Les températures sont légèrement supérieures à la moyenne, mais corrélées avec l'altitude. L'étude du côté négatif de l'axe met en évidence les années 2003, 2005 et 2010 comme les moins arrosées. Ce groupe est porté par des stations situées au Nord-Est de notre zone d'étude.



Les années qui caractérisent le mieux les températures sont essentiellement des années de la deuxième décennie. Elles sont mises en évidence du côté positif ainsi que du côté négatif de l'axe. La deuxième décennie est donc caractérisée par des extrêmes thermiques chauds, mais également froids.

**TABLEAU 6 : Ecart à la moyenne régionale des stations Météo France réparties au sein des différents groupes obtenus par ACP.** Les écarts sont calculés à partir des moyennes de chaque indice pour chaque station en fonction des années attenantes à chaque station par groupe. L'ACP est effectuée à partir des moyennes annuelles de chaque indice pour 22 stations Météo France des Alpes françaises sur la période 1993-2013.

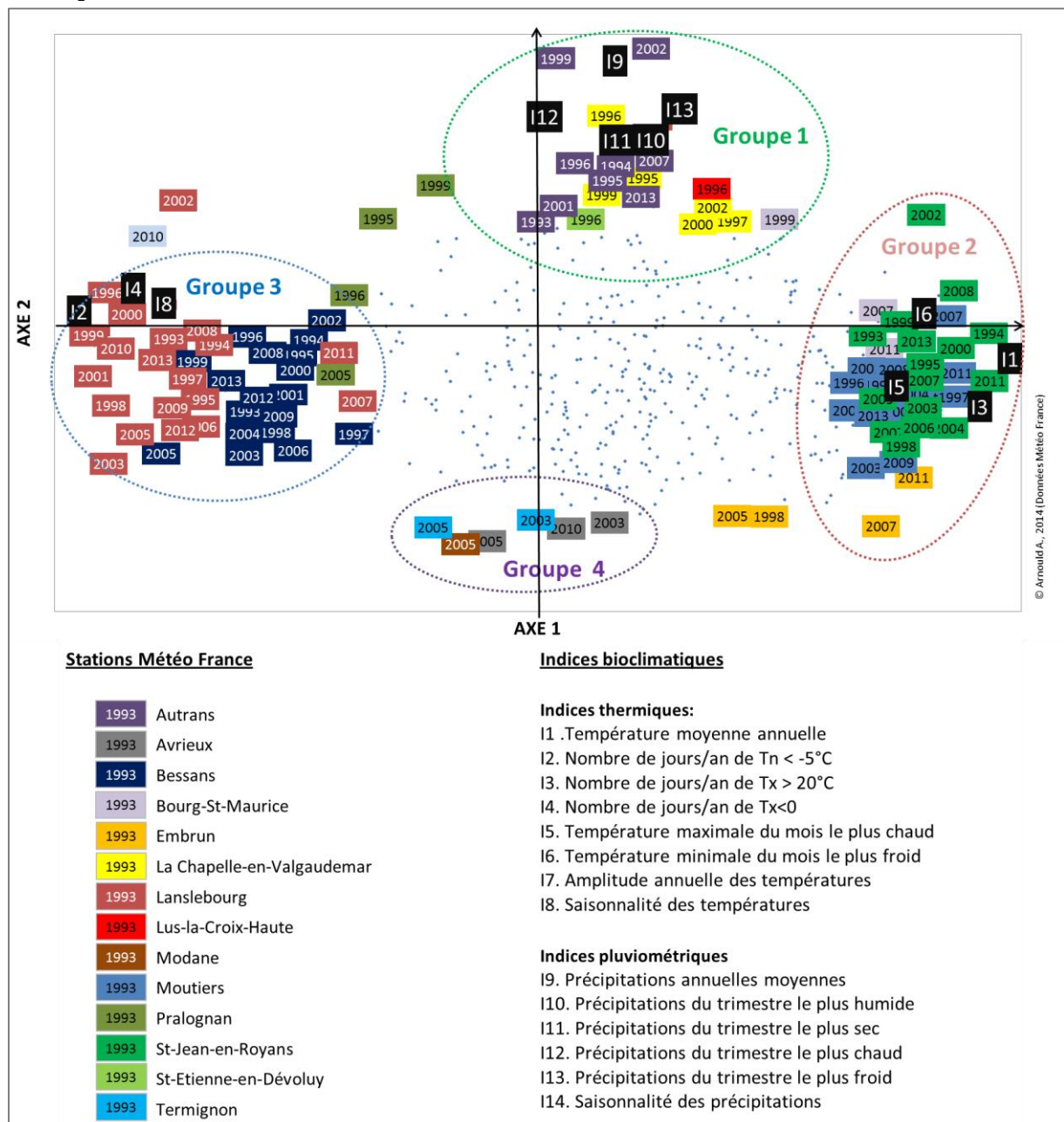
Indices bioclimatiques	Groupe 2				Groupe 3			Moyenne régionale (1993/2013)
	Bourg-St-M.	Embrun	Moutiers	St-Jean-en-R.	Lanslebourg	Pralognan	Bessans	
I1. Température moyenne annuelle (°C)	2,97	3,16	3,80	4,36	-4,92	-2,84	-4,04	7,99
I2. Nombre de jours/an de Tn < -5°C	-27,21	-20,96	-38,76	-41,88	41,48	37,79	63,98	50,21
I3. Nombre de jours/an de Tx > 20°C	55,87	59,37	60,32	61,20	-87,63	-45,63	-32,88	93,13
I4. Nombre de jours/an de Tx < 0	-22,24	-22,24	-19,38	-19,54	60,07	33,26	46,76	23,74
I5. Température maximale du mois le plus chaud (°C)	3,00	3,55	4,40	4,73	-9,12	-2,45	-2,81	29,85
Indices pluviométriques (mm)	Groupe 1				Groupe 4			Moyenne régionale
	Autrans	La Chapelle-en-Val	Lus-la-Croix-Haute	St-Etienne-en-D.	Avrieux	Modane	Termignon	
I9. Précipitations annuelles moyennes	773,76	586,61	536,93	447,53	-528,44	-625,97	-444,22	962, 67
I10. Précipitations du trimestre le plus humide	130,51	300,82	287,69	353,29	-175,51	-225,11	-153,96	286,91
I11. Précipitations du trimestre le plus sec	175,53	98,78	83,56	35,16	-108,34	-120,04	-87,69	193,04
I12. Précipitations du trimestre le plus chaud	178,16	105,96	170,13	69,13	-102,47	-120,57	-89,82	218,47
I13. Précipitations du trimestre le plus froid	164,33	148,19	141,34	108,84	-129,59	-127,46	-98,96	223,06

Au cours des 20 dernières années, les stations localisées aux altitudes les plus élevées des massifs ne sont pas caractérisées par des déficits hydriques importants, du moins en comparaison avec les autres stations du massif. Il en est ainsi pour la plupart des événements thermiques extrêmes.

L'année 1996, caractérisée par des anomalies thermiques négatives à l'échelle des Alpes, est retrouvée à la fois dans les groupes 1, 2 et 3. Le positionnement de ces années dans le groupe 1 peut être la résultante d'une plus forte amplitude thermique, laquelle occasionne des précipitations plus abondantes (analyse des axes F2/F3). Les années caractérisées par des anomalies thermiques positives les plus fortes à l'échelle régionale se répartissent au sein des groupes 2 et 3 essentiellement. Bien que ces années soient marquées par les températures plus fortes, les stations ne répondent pas toutes à ces tendances. Ainsi, si les stations de Moutiers et St-Jean-en-Vercors sont les plus touchées par la hausse des températures, les stations de Lanslebourg et Bessans n'ont quant à elles pas connu de hausse thermique significative (3,2°C de moyenne en 2003 à Lanslebourg, contre 3,1°C de moyenne sur la période 1993-2013).

Finalement, l'ACP effectuée sur la base de la variabilité interannuelle des stations sur la période 1993-1995 a permis d'identifier des situations pour lesquelles les stations ne semblent pas être impactées par les événements climatiques extrêmes.

**FIGURE 13 : Représentation des variables (stations Météo France) et des individus (14 indices bioclimatiques) sur le plan des axes F1 et F2 obtenus par ACP à partir des moyennes annuelles de chaque indice pour 22 stations Météo France des Alpes françaises sur la période 1993-2013.**



## CONCLUSION

Les régressions linéaires effectuées à partir des 32 stations Météo France sélectionnées pour l'étude ont permis d'étudier l'influence de l'altitude et de l'exposition sur les variabilités thermiques et pluviométriques d'une partie des Alpes françaises, et ainsi valider la première hypothèse. Sur la période 1993-2013, l'altitude explique à plus de 60% (souvent plus de 80%) les variations thermiques régionales. Elle explique près de 20% des précipitations. La faible contribution de l'exposition aux modèles de régressions (entre 18 et 51%) permet surtout d'expliquer l'hétérogénéité spatiale des précipitations. Cette hétérogénéité est la résultante de nombreux paramètres, dont l'altitude et l'exposition, mais également la continentalité, la pente, etc. Les gradients issus des modèles de régressions linéaires sont plus faibles pour les températures minimales ( $0,4^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  en moyenne) que pour les températures maximales ( $0,6^{\circ}\text{C}$ ).

Ces analyses ont permis de sélectionner des stations considérées comme les plus appropriées pour la caractérisation du climat local. La connaissance des facteurs influençant la variabilité climatique aux échelles fines (celles des stations) permet de réduire les risques et incertitudes lors de la mise en place d'un éventuel protocole de suivi des alpages par rapport à ces stations. Ainsi, la Chapelle-en-Valgaudemar est la plus appropriée pour la caractérisation du climat de l'alpage de Surette-Vallonpierre dans les Ecrins tout comme celle St-Martin-de-Belleville pour l'alpage des Avals (Vanoise) et Lus-la-Croix-Haute pour l'alpage de Jocou (Vercors).

L'analyse de l'évolution climatique sur la période 1993-2013 à partir des trois meilleures stations définies précédemment comme référentielles d'alpages donne un aperçu de la variabilité climatique interannuelle régionale. La mise en évidence des années thermiques extrêmes coïncide avec les anomalies des températures moyennes annuelles sur les Alpes françaises, calculées à partir des séries climatiques HISTALP par rapport à la période de référence 1961-1990. La comparaison effectuée entre les tendances régionales (HISTALP) et locales (3 stations) permet la mise en relation des années extrêmes quelle que soit l'échelle spatiale ou temporelle. Les tendances observées aux différentes échelles locales sont les mêmes que celles observées à l'échelle régionale, validant ainsi la seconde hypothèse.

L'Analyse en Composantes Principales effectuée sur à partir des moyennes des différents indices bioclimatiques sur la période 1993-2013 permet de résumer 84,6% de l'information contenue dans le tableau initial à l'aide de 3 axes factoriels. La typologie résultante de cette analyse statistique multivariée permet de différencier des groupes de stations présentant des caractéristiques climatiques similaires. Ces caractéristiques similaires regroupent les enregistrements climatiques présentant les écarts à la moyenne régionale des 22 stations utilisées pour la classification les plus proches. Ces groupes sont positionnés en fonction des paramètres thermiques et pluviométriques.

Les résultats, couplés avec ceux issus d'une CAH, admettent l'existence de trois groupes de stations. Le premier groupe est caractérisé par des participations moyennes et des températures froides, le second par des précipitations faibles et des températures chaudes et le troisième par de fortes précipitations et des températures moyennes. L'hétérogénéité spatiale observée pour les températures est la résultante des variations altitudinales, tandis que l'hétérogénéité spatiale des précipitations doit son existence à l'influence de plusieurs paramètres géographiques.

La seconde ACP, réalisée à partir des moyennes annuelles des indices bioclimatiques pour chaque station, apporte des informations sur la réponse climatique des stations aux années extrêmes. Les trois premiers axes factoriels ont été étudiés pour ce cas également, puisqu'ils résument 72,5% de l'information initiale. Les différents groupes de stations obtenus sont répartis selon les mêmes critères sur les différents axes. Les critères de similarité englobant les groupes sont par ailleurs les mêmes. L'analyse de la répartition des stations sur les différents axes laisse apparaître une fois de plus l'altitude comme facteur influençant l'hétérogénéité spatiale des températures.

La deuxième décennie des années 1993-2013 est caractérisée par des extrêmes thermiques à la fois froids (stations d'altitude) et chauds (stations localisées majoritairement en plaine). Cette rupture est confirmée aussi par le groupe 4, mais non pour le groupe 1. Aussi, le positionnement des années d'une même station sur les axes met en évidence une variabilité interannuelle plus forte des températures sur la deuxième décennie. Cette plus grande variabilité peut conduire à une augmentation des précipitations dans certains cas. Enfin, les dommages que peuvent occasionner ces années extrêmes sur la biodiversité et les écosystèmes sont susceptibles de se produire en été, mais également en hivers, avec des épisodes de fortes gelées tardives notamment. En ce qui concerne la réponse des stations face aux épisodes extrêmes reconnus à l'échelle régionale, les stations localisées les plus en altitude sont moins impactées par les déficits hydriques qui touchent les autres stations.

Les températures varient ainsi en grande majorité en fonction des variations altitudinales. Pour ces stations étudiées, il n'y a pas d'effets locaux autre que la température qui semblent modifier les climats de fine échelle, (ou du moins pas qui soit détectable à cette échelle). Une exception s'ajoute pour les stations d'Embrun, Avrieux et Termignon, qui sont localisées dans des vallées largement ouvertes, et donc potentiellement plus ensoleillées. Ces dernières sont caractérisées par des températures plus élevées que la moyenne, bien que les altitudes de celles-ci soient variées.

De nombreux paramètres restent à analyser aujourd'hui, afin d'être sûr d'avoir exploré toutes les caractéristiques climatiques locales, et ainsi faire ressortir d'autres faits saillants qui viendront compléter cette étude. L'objectif est d'aboutir d'ici peu à une carte synthétisant toutes les informations relatives aux différentes analyses bi et multivariées effectuées.



## PERSPECTIVES

Ce diagnostic climatique établit au niveau des stations, il faut à présent tenter de l'extrapoler au niveau des alpages en prenant en compte les différentes interprétations des climats locaux auxquels sont soumises les stations météorologiques. Les alpages situés au sein de ces trois massifs peuvent être mis en relation avec ces différents constats climatiques. Ces derniers, validés d'un point de vue statistique, vont permettre d'analyser les facteurs locaux conditionnant le climat à proximité des alpages afin d'essayer de caractériser ce dernier au plus près de l'alpage même. Néanmoins, tant qu'il n'existera pas de stations météorologiques installées sur les alpages, la caractérisation climatique précise de ses milieux est rendue délicate, et forcément moins proche de la réalité du terrain.

Il paraît intéressant de venir compléter ce diagnostic par une analyse plus fine de quelques stations et de quelques années. L'idéal serait de pouvoir analyser les données quotidiennes des années 2010, 2011, 2012 et 2013 de plusieurs stations entre elles, afin d'affiner l'analyse à une échelle temporelle plus réduite, permettant peut-être de déceler des caractéristiques saisonnières. Ces années sont parmi les plus récurrentes au sein des différents groupes.

La suite de ce travail va également consister en une étude du couvert nival, du moins de sa disparition au printemps. Ce travail va être réalisé à partir des données SPOT/LANDSAT et se concentrera sur l'année 2013. Il permettra de suivre le déneigement des alpages les uns par rapport aux autres, et aussi compléter les informations résumées dans les analyses multivariées.

Bien entendu, un travail de synthèse et de restitution de toutes les analyses effectuées au cours de ce stage sera réalisé.

## RÉFÉRENCES

- Bavay M., Lehning M., Jonas T., Löwe H., 2009 : Simulations of future snow cover and discharge in Alpine headwater catchments. *Hydrological Processes*, **22**, 95-108.
- Beniston M., 1997 : Variations of snow depth and duration in the swiss alps over the last 50years : links to changes in large-scale climatic forcing. *Climatic Change*, **36**, 281-300.
- Beniston M., 2004 : Extreme Climatic Events : example from the alpine region. *Journal de Physique IV*, **121**, 139-149.
- Beniston M., 2005 : Mountain Climates and Climatic Change : an overview of Processes Focusing on the European Alps. *Pure and Applied Geophysics*, **162**, 158-160.
- Beniston M., 2005, Changement climatique et impacts possible dans la région alpine, *Revue de Géographie Alpine*. Tome **93** n°2, 13-24.
- Bigot S., Rome S., Contraintes climatiques dans les Préalpes françaises : évolution récente et conséquences potentielles futures (En ligne). *EchoGéo*, **14**.
- Bigot S., Ancelet S., Rabatel A., Boner R., 2010 : Etude du déneigement saisonnier des 'Alpes sentinelles' du Parc National des Ecrins (France) grâce à l'imagerie MODIS". *12èmes Rencontres scientifiques du Réseau Télédétection de l'AUF, Monastir (Tunisie)*, 23-25 novembre 2010, poster.
- Boesh N., 2011, *Analyse, définition et bilan sur les stratégies d'observation à long terme dans le cadre du projet SECALP, portant sur l'impact des sécheresses répétées sur les alpages et la forêt*. Mémoire de l'Université Rennes 2, Août 2011.
- Castellani C., 1986 : Régionalisation des précipitations annuelles par la méthode de la régression linéaire simple : l'exemple des Alpes du Nord, *Revue de Géographie Alpine*, Tome **74** (4), 349-403.
- Casty C., Wanner H., Luterbacher J., Esper J., Bhom R., 2005 : Temperature and precipitation variability in the European Alps since 1500. *International Journal of Climatology*. **25**, 1855-1880.
- Chaix C., 2007, *Climatologie hivernale des versants alpins (Savoie) : Type de temps, températures et vents. Analyse des données météorologiques des domaines skiables*. Thèse de l'Université de Savoie, Novembre 2007.
- Chessel D., Thioulouse J., Dufou A.B., 1990 : Introduction à la classification hiérarchique (En Ligne). <http://pbil.univ-lyon1.fr/R/stage/stage7.pdf>.
- Deffontaines J-P., 1998, Pour un diagnostic d'alpages : Une traduction de l'expertise des bergers en langage cartographique. L'exemple de l'alpage du Saut du Laire (Hautes Alpes, France). *Revue de Géographie Alpine*, Tome **86** n°1, 31-41.

Dobremez J-F., 2001 : La montagne du biologiste. *Revue de géographie alpine*. Tome **89** (2), 93-100.

Dobremez L., Nettiér B., Legeard J.P., Caraguel B., Garde L., Vieux S., Lavorel S., Dellavedova M., (accepté). Les alpages sentinelles : un dispositif original pour une nouvelle forme de gouvernance partagée face aux enjeux climatiques. *Revue de Géographie Alpine*.

Douguédroit A., Saintignon M-F., 1970 : Méthode d'étude de la décroissance des températures en montagne de latitude moyenne : exemple des Alpes françaises du Sud. *Revue de Géographie Alpine*. Tome **58** (3), 453-472.

Douguédroit A., Saintignon M-F., 1974 : A propos des Alpes Françaises du Sud. Un nouveau mode de représentation des températures moyennes en montagne : l'orothermogramme. *Revue de Géographie Alpine*, Tome **62** (2), 205-217.

Douguédroit A., Saintignon M-F., 1984 : Les gradients de températures et de précipitations en montagne. *Revue de Géographie Alpine*, Tome **72** (2-4), 225-240.

Dumas D., 2012 : Changes in temperature and temperature gradients in the French Alps during the last century. *Theoretical and Applied Climatology*, **91** (1-4), 2012

Etchevers P., Martin E., 2002 : Impact d'un changement climatique sur le manteau neigeux et l'hydrologie des bassins versants de montagne. *Colloque International « L'eau en montagne »*, Megève, Septembre 2002.

Fleury P., Larrère R., Dorioz J.M., Guisepelli E., Jullian C., Birck C., 2003 : Gestion concertée de la biodiversité, agriculture et développement local en montagne. *Montagnes méditerranéennes*, **18**, La gestion concertée dans les espaces naturels protégés de montagne, 65-74.

Folke C., 2006 : Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses, *Global Environmental Change*, **16**, 253-267.

Gauslaa Y., 1984 : Heat resistance and energy budget in different Scandinavian plants. *Ecography*, **7** (1).

Gobiet A., Kotlarski S., 2013 : Beniston M., Heinrich G., Rajczak J., Stoffel M., 2013 : 21st century climate change in the European Alps—A review (En ligne), *Science Total Environment*.

Joly D., Brossard T., Cardot H., Cavailhes J., Hilal M., Wavresky P., 2010 : Les types de climat en France, une construction spatiale (En ligne). *Cybergeog: European Journal of Geography*.

Joly D., 2011 : Variations spatiales des facteurs qui expliquent le volume des précipitations en France : Analyse à l'échelle locale. *Journées de Climatologie Lyon - Climat et société : Climat et eau*, 17-18 mars 2011.

Joly D., Brossard T., Cardot H., Cavailhes J., Hilal M., Wavresky P., 2011: Temperature Interpolation based on local information: the example of France. *International Journal of Climatology*, **31**, 2141-2153.

Körner C., 2003 : Alpine Plant Life. Fonctionnal Plant Ecology of High Mountain Ecosystems. 2<sup>e</sup> Edition, Springer.

Lemaire G., Pfimflin, A., 2007 : Les sécheresses passées et à venir : quels impacts et quelles adaptations pour les systèmes fourragers. *Fourrages*, **191**, 163-180.

Lenoir J., Gegout J-C., Marquet P.A., De Ruffray P., Brisse H., 2008 : A Significant Upward Shift in Plant Species Optimum Elevation During the 20th Century. *Science*, **320**, 1768-1771.

Lhotellier R., 2005 : *Spatialisation des températures en zone de montagne alpine*. Thèse de l'Université Joseph Fourier, Grenoble, Novembre 2005.

Lhotellier R., 2006 : Spatialisation de la température minimale de l'air à échelle quotidienne sur quatre départements alpins français. *Climatologie*, **3**, 55-69.

Menzel A., Sparks T.H., Estrella N., K.E., Aasa A., Ahas R., Alm-Kübler K., Bissolli P., Braslavska O., Briede A., Chmielewski F., Crepinsek Z., Curnel Y., Dahl A., Defila C., Donnelly A., Fifella Y., Jatzczak K., Mage F., Mestre A., Nordli O., Penuelas J., Pirinen P., Remisova V., Scheifinger H., Striz M., Susnik A., Van Vliet A., Wielgolaski F., Zach S., Züst A., 2006 : European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology*, **12**, 1969-1976.

Moisselin J-M., Schneider M., Canellas C., Mestre O., 2002 : Les changements climatiques en France au XXe siècle. Etude des longues séries homogénéisées de données de températures et de précipitations, *La Météorologie*, **38**, 45-56.

Morisette J., Richardson A., Knapp A., Fisher J., Graham E., Abatzoglou J., Wilson B., Breshears D., Henebry G., Hanes J., Liang L., 2009 : Tracking the rhythm of the seasons in the face of global change : phenological research in the 21st century, *Frontiers in Ecology and the Environment*, **7**(5), 253-260.

Nettier B., Dobremez L., Coussy J-L., Romagny T., 2010 : Attitudes des éleveurs et sensibilité des systèmes d'élevage face aux sécheresses dans les Alpes françaises (En ligne), *Revue de Géographie Alpine*, **98** (4).

Nettier B., Dobremez L., Legeard J-P., Della-Vedova M., Garde L., Lavorel S., Brunschwig G., et les collectifs de travail Ecrins, Vanoise et Vercors, 2013 : Les Alpes Sentinelles : un dispositif innovant pour étudier les capacités d'adaptation des systèmes alpage-

exploitations dans un contexte de changement climatique. *Journées AFPP – Prairies, systèmes fourragers et changement climatique 2*, 26-27 Mars 2013.

Ramming A., Jonas T., Zimmerman N., Rixen C., 2010 : Changes in alpine plant growth under future climate conditions (En ligne). *Biogeosciences*, **7**.

Sanders L., 1992 : L'analyse statistique des données en géographie. *Espace géographique*, Tome **21** (3), 284-286.

Seguin B., Soussana J.F., 2006 : Le réchauffement climatique (prédictions futures et observations récentes) en lien avec les émissions de GES. *Fourrages*, **186** : 139-154.

Seiler W., 2006 : Der Klimawandel im Alpenraum: Trends, Auswirkungen und Herausforderungen. In Lebensministerium: Alpenkonvention: Klimawandel im Alpenraum-Auswirkungen und Herausforderungen, *Wien*, 7-20.

Sérés C., 2010 : Changement Climatique et agriculture d'élevage en zone de montagne : premiers éléments de réflexion, *Courrier de l'Environnement de l'INRA*, **58**.

Sérés C., 2010 : L'agriculture de montagne face au changement climatique : exposition des territoires et marges de manœuvre pour les exploitations laitières. *Courrier de l'Environnement de l'INRA*, **59**.

Soubeyroux J-M., Kitova N., Blanchard M., Vidal J-P., 2011 : Impact du changement climatique sur la sécheresse et l'eau du sol en France : les résultats du projet CLIMSEC. *III<sup>ème</sup> rencontre de la recherche et du développement en Poitou Charentes, Changement Climatique : quelles perspectives pour l'agriculture régionale*, Melle, 6 décembre 2011.

Urand Y., Giraud G., Laternser M., Etchervers P., Mérindol L., Lesaffre B., 2009 : Reanalysis of 47 years of climate in the French Alps (1958–2005): climatology and trends for snow cover. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **48**, 2487-2512.

Walker B., Holling C.S., Carpenter S., Kinzig A., 2004 : Resilience, adaptability and transformability in social–ecological systems. *Ecology and Society*, **9**(2), 5.



# TABLE DES ILLUSTRATIONS

## FIGURES

Figure 1: Répartition des parcs naturels (Ecrins, Vanoise, Vercors) au sein de différents départements de la région Rhône-Alpes. ....	9
Figure 2: Répartition des Alpes Sentinelles au sein des parcs naturels alpins : le Parc National des Ecrins, le parc National de la Vanoise, le Parc Naturel Régional du Vercors. ....	13
Figure 3 : Localisation des 32 stations Météo France disposant de données mensuelles relatives aux températures et aux précipitations sur la période 1993-2013. ....	14
Figure 4 : Coefficient de détermination ( $R^2$ ) entre d'une part la variable a) altitude et b) exposition, et d'autre part les paramètres climatiques suivants : précipitations (RR en mm), températures minimales (Tn en °C), températures maximales (Tx en °C) et nombre de jours de gel. ....	21
Figure 5: Gradients thermiques issus des modèles de régressions linéaires corrélant l'altitude par rapport aux températures minimales (en bleu) et maximales (en rouge). 22	
Figure 6 : Répartition spatiale des paramètres climatiques étant majoritairement justifiés par les variations d'altitude. Les stations ayant comme principal marqueur du climat local les conditions topographiques peuvent servir de stations de référence pour la caractérisation d'un alpage situé à proximité (distance maximale de 15 km). ....	23
Figure 7: Variations climatiques interannuelles des écarts à la moyenne (1993-2013) de 3 stations Météo France des Alpes (La Chapelle-en-Valgaudemar, 1270 m, massif des Ecrins ; Lus-la-Croix-Haute, 1059 m, massif du Vercors ; St-Martin-de-Belleville, 1500 m, massif de la Vanoise pour a) les températures moyennes mensuelles (°C) et b) le cumul mensuel de précipitations (mm). ....	25
Figure 8 : Variations climatiques interannuelles des écarts à la moyenne (2005-2013) de 3 stations Météo France des Alpes (La Chapelle-en-Valgaudemar, 1270 m, massif des Ecrins ; Lus-la-Croix-Haute, 1059 m, massif du Vercors ; St-Martin-de-Belleville, 1500 m, massif de la Vanoise et de la station éco-climatique de Darbounouse (Vercors) pour a) les températures moyennes mensuelles (°C) et b) le cumul mensuel de précipitations (mm). ....	26

Figure 9: Anomalies des températures moyennes annuelles calculées à partir des séries climatiques homogénéisées HISTALP des Alpes françaises par rapport à la période de référence 1961-1990. .... 27

Figure 10 : Représentation des variables (22 stations Météo France des Alpes françaises) et des individus (14 indices bioclimatiques) sur le plan des axes F1 et F2 obtenus par ACP à partir des moyennes de chaque indice sur la période 1993-2013..... 30

Figure 11: Distribution des types (groupes) de stations en fonction de leur barycentre pour chacun des 14 indices bioclimatiques. .... 31

Figure 12 : Répartition des différents groupes issus de la CAH obtenue à partir de la moyenne sur la période 1993-2013 d'indices bioclimatiques pour 22 stations Météo France des Alpes françaises..... 32

Figure 13 : Représentation des variables (stations Météo France) et des individus (14 indices bioclimatiques) sur le plan des axes F1 et F2 obtenus par ACP à partir des moyennes annuelles de chaque indice pour 22 stations Météo France des Alpes françaises sur la période 1993-2013. .... 37

## TABLEAUX

Tableau 1 : tableau descriptif des 14 indices bioclimatiques utilisés pour établir les typologies. .... 18

Tableau 2 : Stations retenues et leur(s) paramètre(s) climatique(s) associés pour le suivi climatique des Alpes Sentinelles. La distance correspond à l'éloignement de la station par rapport à l'alpage (en km)..... 24

Tableau 3 : Regroupement des stations météorologiques en 3 classes définies par la CAH et basé sur des critères de proximité à partir des indices bioclimatiques sur la période 1993-2013..... 31

Tableau 4: Moyennes annuelles de chaque indice bioclimatique calculées à partir des séries de 22 stations Météo France des Alpes françaises et utilisées pour établir une typologie des stations selon la variabilité interannuelles des paramètres thermiques (en °C) et pluviométriques (en mm) sur la période 1993-2013..... 34

Tableau 5 : Répartition des stations et années dans les différents groupes obtenus par Analyse en Composantes Principales à partir des moyennes annuelles de chaque indice pour 22 stations Météo France des Alpes françaises sur la période 1993-2013..... 35

Tableau 6 : Ecart à la moyenne régionale des stations Météo France réparties au sein des différents groupes obtenus par ACP. Les écarts sont calculés à partir des moyennes de chaque indice pour chaque station en fonction des années attenantes à chaque station par groupe. L'ACP est effectuée à partir des moyennes annuelles de chaque indice pour 22 stations Météo France des Alpes françaises sur la période 1993-2013. .... 36

# TABLES DES MATIERES

Résumé.....	2
Abstract.....	2
Remerciements.....	3
Liste des acronymes.....	5
Introduction .....	6
Les alpages, espaces à forts enjeux environnementaux, sociaux et économiques .....	6
Les alpages sentinelles, indicateurs des crises climatiques aujourd'hui... ..	7
...pour limiter les impacts demain.....	8
Une approche régionale pour des réponses locales .....	10
1. Contexte général de l'étude.....	12
1.1. Le programme Alpes Sentinelles.....	12
1.2. Les séries climatiques issues du réseau Météo France .....	13
2. Methodologie .....	16
2.1. Les régressions linéaires .....	17
2.2. Sélection et calculs des indices bioclimatiques .....	17
2.3. Réalisation de la typologie par des méthodes statistiques multivariées.....	18
2.3.1. L'Analyse en Composantes Principales (ACP).....	19
2.3.2. La Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) .....	19
3. Résultats.....	21
3.1. les facteurs géographiques, marqueurs du climat local .....	21
3.2. L'évolution climatique récente (1993-2013).....	24
3.3. Typologie des climats locaux .....	28
3.3.1. Les conditions géographiques comme marqueurs des climats locaux.....	28
3.3.2. La variabilité interannuelle, génératrice d'informations sur la réponse climatique des stations aux années extrêmes .....	33
Conclusion.....	38
Perspectives .....	40
Références.....	41
Table des illustrations.....	45
Figures.....	45
Tableaux .....	46
Tables des matières.....	48
Annexes.....	49

## ANNEXES

### ANNEXE 1 : TABLEAU RECAPITULATIF DES 22 STATIONS PRISES EN COMPTE POUR LES ANALYSES MULTIVARIEES

MASSIF	NOM_STATION	Altitude
Ecrins	CEILLAC	1665
Ecrins	EMBRUN	871
Ecrins	LA CHAPELLE-EN-VALGAUDEMAR	1270
Ecrins	LES ORRES	1445
Ecrins	PELVOUX	1270
Ecrins	SAINT-ETIENNE-EN-DEVOLUY	1300
Ecrins	SAINT-FIRMIN	950
Ecrins	VALJOUFFREY	980
Vanoise	AVRIEUX	1102
Vanoise	BESSANS	1715
Vanoise	BOURG-SAINT-MAURICE	865
Vanoise	LANSLEBOURG-MONT-CENIS	2000
Vanoise	MODANE	1228
Vanoise	MOUTIERS	480
Vanoise	PEISEY-NANCROIX	1350
Vanoise	PRALOGNAN-LA-VANOISE	1420
Vanoise	SAINT-MARTIN-DE-BELLEVILLE	1500
Vanoise	TERMIGNON	1280
Vercors	AUTRANS	1090
Vercors	LUS-LA-CROIX-HAUTE	1059
Vercors	MONESTIER-DE-CLERMONT	800
Vercors	SAINT-JEAN-EN-ROYANS	308



**ANNEXE 2 : DONNEES UTILISEES POUR L'ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES N°1  
ET LA CLASSIFICATION ASCENDANTE HIERARCHIQUE. LE TABLEAU RESTITUE LES  
MOYENNES DE CHAQUE INDICE BIOCLIMATIQUE CALCULE PAR STATION SUR LA PERIODE  
1993-2013.**

MASSIF	NOM_STATION	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	I10	I11	I12	I13	I14
Ecrins	CEILLAC	6,40	68,71	67,00	21,67	30,50	-17,80	48,30	0,32	776,70	229,51	124,66	204,73	143,94	0,09
Ecrins	EMBRUN	10,93	24,05	142,76	3,38	34,60	-17,50	52,10	0,22	724,87	231,75	137,22	154,84	161,27	0,14
Ecrins	LA CHAPELLE-EN-VALGAUDEMAR	7,42	52,29	78,81	21,00	30,60	-20,80	51,40	0,27	1298,51	437,50	258,25	257,40	299,69	0,16
Ecrins	LES ORRES	7,65	48,29	79,95	13,05	32,50	-17,50	50,00	0,29	862,23	265,66	149,32	195,49	175,80	0,15
Ecrins	PELVOUX	8,00	60,52	110,29	10,20	34,00	-17,90	51,90	0,27	927,96	326,00	195,62	166,75	233,16	0,20
Ecrins	SAINT-ETIENNE-EN-DEVOLUY	7,03	70,29	91,38	22,24	34,30	-25,10	59,40	0,29	1093,80	389,24	204,38	191,53	245,11	0,24
Ecrins	SAINT-FIRMIN	9,44	35,14	121,05	12,95	35,00	-18,80	53,80	0,24	1113,05	390,13	236,41	188,30	281,93	0,23
Ecrins	VALJOUFFREY	8,40	45,71	111,00	18,43	35,00	-23,50	58,50	0,24	1104,61	354,20	232,99	221,58	269,89	0,15
Vanoise	AVRIEUX	8,32	42,90	98,48	22,33	33,30	-21,10	54,40	0,24	574,56	170,87	112,96	140,91	137,02	0,12
Vanoise	BESSANS	3,91	114,48	59,67	67,81	29,20	-27,80	57,00	0,37	832,80	232,46	156,33	201,90	184,22	0,14
Vanoise	BOURG-SAINT-MAURICE	10,32	28,90	131,67	6,90	36,10	-18,80	54,90	0,21	964,70	267,69	236,49	239,59	280,56	0,09
Vanoise	LANSLEBOURG-MONT-CENIS	3,06	88,33	5,47	82,76	23,20	-20,90	44,10	0,49	881,63	215,17	98,70	250,78	108,60	0,25
Vanoise	MODANE	7,76	37,81	80,86	32,24	32,30	-19,60	51,90	0,26	658,23	192,01	138,33	159,90	161,77	0,13
Vanoise	MOUTIERS	11,65	17,65	152,00	7,26	37,40	-15,20	52,60	0,19	920,91	255,42	226,10	227,20	267,13	0,08
Vanoise	PEISEY-NANCROIX	7,96	41,38	82,71	26,52	31,50	-19,90	51,40	0,26	942,00	249,06	202,47	255,48	237,43	0,11
Vanoise	PRALOGNAN-LA-VANOISE	5,66	77,29	56,76	45,38	30,00	-23,40	53,40	0,31	1080,64	285,48	236,56	287,36	269,18	0,11
Vanoise	SAINT-MARTIN-DE-BELLEVILLE	6,20	65,81	56,67	28,90	30,30	-23,40	53,70	0,30	905,78	235,66	189,53	255,27	220,75	0,12
Vanoise	TERMIGNON	7,24	64,62	90,52	21,52	33,00	-23,90	56,90	0,27	592,08	183,37	83,24	148,53	171,82	0,13
Vercors	AUTRANS	7,24	52,14	71,48	22,33	31,70	-21,60	53,30	0,28	1503,91	392,70	314,73	360,19	334,68	0,12
Vercors	LUS-LA-CROIX-HAUTE	8,79	35,52	102,38	16,43	34,60	-18,70	53,30	0,26	1141,15	369,54	216,80	212,59	265,56	0,24
Vercors	MONESTIER-DE-CLERMONT	9,29	23,52	106,38	17,10	35,00	-17,90	52,90	0,25	963,71	314,90	239,87	217,52	267,36	0,15
Vercors	SAINT-JEAN-EN-ROYANS	12,13	10,65	152,19	6,17	38,00	-16,90	54,90	0,20	1157,51	323,68	205,60	268,55	208,89	0,16